Simulation und Wirtschaftlichkeit von Luftkollektor-Speicher-Systemen zur solarunterstützten Trocknung am Beispiel des Tabaks

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur

genehmigt von der Fakultät für Maschinenbau
der Ruhr-Universität Bochum

von

Dipl.-Ing. Klaus Bolst

Bochum 1983

Simulation und Wirtschaftlichkeit von Luftkollektor-Speicher-Systemen zur solarunterstützten Trocknung am Beispiel des Tabaks

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur

genehmigt von der Fakultät für Maschinenbau
der Ruhr-Universität Bochum

von

Dipl.-Ing. Klaus Bolst

Bochum 1983

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Referent: Prof. Dr.-Ing. M. Fiebig
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. H. Kremer
Tag der mündlichen Prüfung: 1.7.1983

Die vorliegende Untersuchung entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Assistent am Institut für Thermo- und Fluiddynamik der Ruhr-Universität Bochum.

Meinem Lehrer, Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Fiebig, der diese Arbeit angeregt und ermöglicht hat, danke ich für die zahlreichen kritischen Diskussionen und fruchtbaren Anregungen, die zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben. Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Kremer, der freundlicherweise das Korreferat übernahm, gilt mein Dank für das Interesse an dieser Arbeit und die wertvollen Empfehlungen.

Nicht zuletzt danke ich meiner Frau für ihre tatkräftige Hilfe und kritischen Anmerkungen bei der Niederschrift des Manuskripts.

Simulation und Wirtschaftlichkeit von Luftkollektor-Speicher-Systemen zur solarunterstützten Trocknung am Beispiel des Tabaks

Übersicht

Es wird das Leistungs- und Betriebsverhalten eines großen Luftkollektor-Speicher-Systems zur solarunterstützten Virgin-Heißlufttrocknung mit 10 t-Bulk-Trocknern untersucht. Die Anlage wurde in Salta/ Nordargentinien errichtet.

Mit Hilfe des TRNSYS-Simulators wird ein flexibles Computermodell für das Solarsystem und einen Trockner entwickelt. Das thermische Verhalten der Anlage kann zufriedenstellend nachgebildet werden. Modellexperimente zeigen, daß die Regelungsvorgaben zur besseren Ausnutzung des Solarsystems korrigiert werden müssen. Maßnahmen, wie Abdichten der Leckagen sowie Einbau einer Kollektorabdeckung mit höherer Transmission, können den solaren Deckungsanteil auf über 50 % steigern. Variantenrechnungen mit verschiedenen Konfigurationen belegen, daß die Auslegung gut gewählt ist. Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse gibt Aufschluß über die Rentabilität dieser Anlage.

Inhalt

	Seite
1. Einleitung und Aufgabenstellung	1
2. Darstellung der Systemsimulation	12
2.1 Grundbegriffe der Simulation	12
2.2 Übersicht über die Arbeitsschritte der Methode	13
2.3 Modellentwicklung	15
2.3.1 Methode	15
2.3.2 Probleme der Modellentwicklung	17
2.4 Die Gültigkeitsbestimmung des Modells	23
2.5 Anwendungsmöglichkeiten der Systemsimulation	26
2.6 Simulation von Solaranlagen	27
2.6.1 Überblick über vorhandene Simulationssysteme und deren Einsatzmöglichkeiten	28
2.6.2 Der TRNSYS-Simulator	28
3. Systemanalyse und Modellsynthese einer solaren Trocknungsanlage	33
3.1 Analyse und Darstellung der wichtigsten Komponenten	33
3.1.1 Gesamtanlagenschema	33
3.1.2 Der Trockner	38
3.1.3 Das Kollektorfeld	51
3.1.4 Der Speicher	57
3.1.5 Gebläse und Leitungssystem	64
3.1.6 Anlagenregelung	66
3.1.7 Luftleckagen	67
3.2 Zusammenfassung der Einzelkomponenten	72
3.3 Modellqualifikation	78

Seite

4. Validation 79

4.1 Vorgehen 79

4.2 Ergebnisse der Validation 82

4.2.1 Betrieb des Kollektorfeldes mit den kleinen Gebläsen 82

4.2.2 Betrieb des Kollektorfeldes und des Speichers mit allen Gebläsen 85

4.2.3 Langzeitverhalten des Speichers 89

4.2.4 Zusammenschluß der Komponenten 91

5. Untersuchung und Voraussage des Anlagenverhaltens unter variablen Bedingungen 97

5.1 Wetterbedingungen 97

5.2 Basisanlagenkonfiguration 101

5.3 Solarer Deckungsanteil und Lasterfüllung in Abhängigkeit von Anlagenmodifikationen 106

5.4 Auswirkung der Speicherkapazität auf den solaren Deckungsanteil 111

5.5 Auswirkung der Anlagenvergrößerung bzw. -verkleinerung auf den solaren Deckungsanteil 114

5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse 115

6. Wirtschaftlichkeitsanalyse 117

6.1 Bestimmung der Vorgaben 117

6.2 Methode der Kostenrechnung 118

6.3 Kostenstruktur des Systems 122

6.4 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse 127

6.5 Zusammenfassung 132

Seite

7. Schlußbetrachtung 133

Anhang 1 bis 8 136

Literaturverzeichnis 173

Bezeichnungen

Die wichtigsten Größen sind:

A	Fläche	m^2
a	Oberflächendichte	m^2/m^3
C_A	flächenabhängige Kosten	$\$/m^2$
C_E	alle Kosten, die unabhängig von der Kollektorfläche sind	\$
C_{Fl}	spezifischer Ölpreis für Heizöl	\$/kJ
C_S	Gesamtkosten	\$
c_{pD}	spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf	kJ/(kg·K)
c_{pL}	spezifische Wärmekapazität von trockener Luft	kJ/(kg tr. Luft·K)
d	Diskontsatz	%
D	Durchmesser	m
D	Verhältnis der Tilgungsraten des Darlehens zu den Gesamtkosten	%
h	spezifische Enthalpie	kJ/kg tr. Luft
h_v	volumetrischer Wärmeübergangskoeffizient	$kW/(m^3\ K)$
Δh_v	Verdampfungsenthalpie von Wasser	kJ/kg
i_f	Inflationsrate für Heizöl	%/Jahr
i_g	allgemeine Inflationsrate	%/Jahr
I	Sonneneinstrahlung	kW/m^2
k	Wärmedurchgangszahl	$kW/(m^2\ K)$
L	Länge	m
$\dot{M}$	Massenstrom trockener Luft	kg tr. Luft/h
$\Delta\dot{M}$	Wasserentzug	kg/h
M_S	Mischkosten im 1. Jahr im Verhältnis zu den Gesamtkosten	%

N_E	Dauer der Wirtschaftlichkeitsrechnung	Jahre
N_L	Laufzeit des Darlehens	Jahre
N_{min}	Minimum von N_E und N_L	Jahre
PWF	Present-Worth-Factor (Gegenwartswertfaktor)	
Q	Energie	
$\dot{Q}$	Wärmestrom	kW
Q_{Load}	Gesamtenergieverbrauch nach einem Jahr	kJ
SAL	Verhältnis des Wiederverkaufswertes zur Gesamtinvestition	%
SF	solarer Deckungsanteil	
T	Temperatur	^oC
TQ	effektiver Einkommenssteuersatz	%
Δt	Zeitintervall	h
U	Umfang	m
V	Volumen	m^3
V	Verhältnis des geschätzten Wertes im 1. Jahr zur Gesamtinvestition	
$\dot{W}$	Ventilatorantriebsleistung	kW
x	Wassergehalt der Luft	kg H_2O/kg tr. Luft
x	Längskoordinate	m
η	Kollektorwirkungsgrad	
α	Wärmeübergangszahl	kW/(m^2 K)
ε	Porosität des Speichers	
ρ	Rezirkulationsrate des Trockners	
ρ	Dichte	kg/m^3
λ	Wärmeleitfähigkeit	kW/(m K)

Indizes

A	Austritt
Aus	Austrittszustand bei Feuchteregulierung
E	Eintritt
Ein	Eintrittszustand bei Feuchteregulierung (Umgebungszustand)
G	Gebläse
ges	gesamt
I	Interimszustand (im Trockner vor Tabak)
K	Kollektor
L	Luft
Leck	Leckage
Mess	gemessener Wert
m	Mittelwert
R	Rezirkulation, Rohrleitung
real	real
Rechen	gerechneter Wert
S, Sp	Speicher
Solar	Solaranlage
Soll	Sollwert
T	Trockner
theor	theoretisch
∞	auf die Umgebung bezogen
V	Verlust
Zus	Zusatzheizung

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Die Landwirtschaft benötigt zur Auftrocknung von Erntefrischgut den größten Bedarf an Wärmeenergie in der Jahreszeit mit der höchsten Sonneneinstrahlung. In den industrialisierten Ländern wird als Konservierungsmethode zur optimalen Werterhaltung von Frischprodukten hauptsächlich das heizölbetriebene Trocknungsverfahren angewandt. Der wirtschaftliche Effekt dieser Trocknungsart liegt in der Vermeidung von Qualitäts- und Quantitätsverlusten bei den Ernteerträgen, wie sie bei herkömmlichen Feld- und Kaltluftverfahren zu einem hohen Prozentsatz in Kauf genommen werden müssen.

Eine der Kulturpflanzen, die mit großer Sorgfalt getrocknet werden muß, ist der Tabak. In fast allen Ländern der Welt wird Tabakbau betrieben. Die Tabakpflanze ist äußerst empfindlich und stellt besondere Anforderungen an Boden und Klima bei Anbau und Ernte sowie an die Trocknung. Um ein qualitativ hochwertiges Produkt zu erzielen, müssen die Trocknungstemperatur und relative Luftfeuchtigkeit im Gegensatz zu anderen landwirtschaftlichen Gütern genauestens überwacht und in engen Grenzen geregelt werden. Diese Regelung ist so wichtig, weil sich während des Trocknungsvorgangs gleichzeitig auch ein Reifeprozeß vollzieht, bei dem komplexe biochemische Reaktionen ablaufen. Schon geringfügige mikroklimatische Veränderungen besonders in der Vergilbungsphase können die Entwicklung der Aroma- und Geschmacksstoffe entscheidend beeinflussen.

Für die Trocknung von Tabak werden im wesentlichen zwei Verfahren benutzt, die Luft- und die Heißlufttrocknung.
Bei der Lufttrocknung werden je nach Klimaverhältnissen entweder die ganzen geschnittenen Tabakpflanzen oder aber Einzelblätter in offene Schuppen gehängt und unter Umgebungsbedingungen getrocknet. Die Dauer des Trocknungsvorgangs ist witterungsabhängig und liegt zwischen vier und acht Wochen.
Bei der Heißlufttrocknung, die speziell bei der Sorte Virginia angewandt wird, werden nur die Blätter in eigens dafür gebauten Trockenhäusern unter Einhaltung vorgegebener Tempe-

ratur- und Feuchteverläufe getrocknet. Für die Energiebereitstellung bei dieser Trocknungsart, deren Standardzyklus fünf bis sieben Tage beträgt, wird entsprechend den regionalen Gegebenheiten entweder Öl, Kohle oder Holz verfeuert.

Mitte der 60er Jahre wurde in den USA und Kanada zur Trocknung von Virgin-Tabak das sogenannte Bulk-Trocknungsverfahren entwickelt, bei dem Tabak dicht gepackt auf Racks (Metallrahmen mit langen Eisennadeln) in die Trockner gehängt wird, und das sich dadurch auszeichnet, daß bei geringem Platzbedarf große Mengen Tabak durch den Einsatz von Ölbrennern gleichmäßig und kontrolliert aufgetrocknet werden können. An dieser Stelle sei angemerkt, daß zur Erzeugung von 1 kg Rohtabak etwa 10 kg grüner Tabak und ca. 1 l Öl benötigt werden. Zur Zeit der Einführung des Bulk-Curings spielte jedoch der Ölpreis im Zusammenhang mit der Tabaktrocknung nur eine untergeordnete Rolle. Im Jahre 1974 sind beispielsweise in den USA, dem größten Tabakerzeugerland nach der Volksrepublik China, insgesamt 902 Millionen kg Tabak im Werte von umgerechnet 2146 Millionen US $ produziert worden. Allein für die Heißlufttrocknung von hellem Virgin-Tabak wurden $931 \cdot 10^6$ Liter Öl verbraucht, was etwa einem Drittel der gesamten erforderlichen Energiemenge für die Erntetrocknung in den USA entspricht. /1/

Erst der sprunghafte Anstieg der Rohölpreise nach Beendigung des Jom-Kippur-Krieges im Jahre 1973 bewirkte, daß Forschungsprogramme zur Untersuchung der solarunterstützten Tabaktrocknung aufgestellt wurden, die sich schwerpunktmäßig mit der Reduzierung des großen Bedarfs an konventioneller Energie bei der Heißlufttrocknung befaßten. /1/ Wie sich der Forschungsstand auf diesem Gebiet in den verschiedensten Ländern Mitte der 70er bis zu Beginn der 80er Jahre entwickelte, soll im folgenden kurz wiedergegeben werden. Alle Arbeiten behandeln den Standardtrocknungsprozeß der Virgin-Tabake und hier speziell das Bulk-Trocknungsverfahren:

CHANG und HUANG /2/ stellten in ihrer Untersuchung 1976 als erste eine solarbetriebene Virgin-Trocknungsanlage vor. Es handelte sich um ein kleines Versuchsgewächshaus mit einem

Steinspeicher im Boden, das auch als Heißlufttrockner benutzt werden konnte. Die Kollektorfläche betrug ca. 123 m^2, und der Trockner faßte 6,2 t grünen Tabak. Über die Trocknungsergebnisse und den solaren Deckungsanteil wurde nichts mitgeteilt. Parallel zur Entwicklung dieses kombinierten Trocknungssystems sind Simulationen auf einem Analogrechner durchgeführt worden, um das Verhalten des Solarsystems sowie des Trockners zu untersuchen. Messungen eines Standardzyklus dienten als Lastvorgabe.

DREWES und HEATH /3/ benutzten 1978 auf einer landtechnischen Station in Ontario (Kanada) vorhandene Gewächshäuser als Kollektoren, die tagsüber einen in der Erde eingegrabenen Speicher sowie einen nicht weiter beschriebenen Virgin-Trockner mit warmer Luft versorgten. Die Gewächshäuser besaßen eine Gesamtgrundfläche von 181 m^2, der Steinspeicher enthielt 100 t Kalksteine. Über den Energieverbrauch und den Deckungsanteil liegen keine Angaben vor.

1979 veröffentlichten CUNDIFF et al. /4/ experimentelle Ergebnisse eines mit zwei Wärmetauschern gekoppelten Luftkollektor-Steinspeicher-Systems, die sie an drei maßstäblich verkleinerten Trocknern ermittelten. Die Modelltrockner faßten je ca. 1,3 t grünen Tabak. Die Kollektorfläche betrug 140 m^2, der Speicher enthielt 103 t Kiesel. Der solare Deckungsanteil für den Gesamtzyklus wurde mit ca. 33 % angegeben. In diesem Verfahren erwärmte die heiße Luft das Wasser, das wiederum seine Wärme im Trockner an die zirkulierende Luft abgab, im Gegensatz zu Systemen, bei denen die Brennerabgase direkt in den Tabak geblasen werden. Die Autoren empfahlen dieses System auch zur Trocknung von Getreide und Erdnüssen.

NASSAR et al. /5/ publizierten 1979 Untersuchungen über ein Gewächshaus-Virgin-Trocknungssystem, das dem von CHANG und HUANG /2/ ähnelt. Der Schwerpunkt dieser Arbeit lag jedoch auf der Beschreibung einer vollautomatischen mikroprozessorgesteuerten Anlage, um die komplizierte Steuerung und Regelung der Solaranlage zu erleichtern. Meßergebnisse wurden nicht veröffentlicht.

CUOZZO (1978) /6/ und ANDREOTTI et al. (1978) /7/ untersuchten das Verhalten des ersten 1977 in Italien in Betrieb genommenen Pilotprojekts, einem 6 t fassenden Trockner mit einem Feld aus 74 m^2 konzentrierenden Kollektoren, die mit zwei 3000 l fassenden Wasserspeichern verbunden waren. Das Kollektorsystem arbeitete in einem Wirkungsgradbereich von ca. 58 bis 63 %, der solare Deckungsanteil lag bei ca. 25 %. Weitere 12 bis 15 % des Gesamtwärmebedarfs konnten durch ein nicht näher beschriebenes Wärmerückgewinnungssystem gedeckt werden. Außerhalb der Trocknungssaison beheizte das Solarsystem ein Gewächshaus, über das jedoch keine Einzelheiten vorliegen.

In der UdSSR wurde ebenfalls seit Ende der 70er Jahre mit dem Einsatz von Solarenergie für die Virgin-Heißlufttrocknung experimentiert. ARTYKOV und MAKSUDOV /8/ entwickelten 1978 einen Modelltrockner ohne Zusatzheizung mit einem Volumen von 1 m^3, der nur durch einen 2,5 m^2 großen Luftkollektor und einen nicht genauer erläuterten Speicher betrieben wurde. Die Untersuchungen beruhen auf einem Standardtrockenzyklus von vier bis sechs Tagen in einem Temperaturbereich von 35 bis 80° C. Den Angaben zufolge wurden für den zu 100 % solarbetriebenen Prozeß umgerechnet auf 10 t frischen Tabak zwischen $7{,}6 \cdot 10^7$ und $1{,}5 \cdot 10^8$ kJ benötigt. Detailliertere Angaben existieren nicht. Der Arbeit war auch nicht zu entnehmen, wo die Versuchsanlage aufgebaut worden ist.

BOSE /9/ beschrieb 1980 in einer Untersuchung das indische Pilotprojekt für solare Tabaktrocknung. Es handelte sich um einen ursprünglich mit Kohle beheizten Trockner ohne Speicher, der 1,2 t frischen Tabak faßt und auf Luftkollektorbetrieb (28 m^2) umgerüstet wurde. Über den solaren Deckungsanteil liegen nur ungenügende Angaben vor. Es wird behauptet, daß der Kohleverbrauch, der für die Trocknung von 600 kg Tabak benötigt wurde, von ca. 700 kg bei konventionellem Betrieb auf etwa 300 kg bei Solarbetrieb gesenkt werden konnte. Das entspräche einem Deckungsanteil von 42 %. Weitere Ergebnisse werden nicht genannt.

Bei allen hier skizzierten solarbetriebenen Projekten wurde der Tabak in herkömmlicher Weise in die Trockenhäuser eingehängt. Erste Versuche, diese Art der Einbringung zu ändern, wurden durch JOHNSON /10/ 1979 bekannt. Er berichtete, daß von der Oxford Tobacco Research Station drei separate Trockenkammern, die durch Luftleitungen miteinander verbunden waren, nebeneinander errichtet wurden, so daß die Abluft des einen noch im nächsten Trockner genutzt werden konnte. In diese Trockenhäuser, deren Dächer als Kollektoren ausgebildet waren, wurde Virgin-Tabak auf fahrbaren Gestellen hineingeschoben. Messungen zeigten, daß durch den Mehrkammerbetrieb mit Wärmerückgewinnung Energieeinsparungen bis zu 70 % gegenüber konventionellen Systemen erzielt werden konnten.

Da der Trocknungsprozeß bei Tabaksorten wie Burley- und Orienttabaken anders verläuft - es wird mit Umgebungsluft getrocknet -, fällt diese Trocknungsart nicht in den Themenbereich dieser Untersuchung. Der Einsatz der Solarenergie dient bei diesen Tabaken nur zur Verbesserung der Qualität des Trockengutes. /11, 12, 13, 14, 15, 16/ Ebenfalls nicht behandelt wird die Trocknung landwirtschaftlicher Güter mit Solarenergie, über die es zahlreiche Veröffentlichungen gibt /17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24/, und deren Trocknungsprozeß weniger kompliziert ist, weil mit gleichbleibender Temperatur getrocknet wird.

Bei den erwähnten Virgin-Trocknungsprojekten handelte es sich durchweg um kleine Trockner oder speziell entwickelte Versuchstrockner. Untersuchungen an industriell gefertigten Großtrocknern wurden nicht durchgeführt. Den Ausführungen ist auch nicht zu entnehmen, wie sich die Solaranlagen im Betrieb mit kommerziellen Großtrocknern verhalten werden. Es ist aber anzunehmen, daß in einem solchen Falle Fehler und Probleme auftreten, die bei den kleinen Prototypen nicht ins Gewicht fallen und deren Einfluß deshalb nicht abschätzbar ist. Da bei diesen Kleinsystemen Leckagen, Unzulänglichkeiten an Kollektor, Spei-

cher und Regelung schneller bemerkt und abgestellt werden können, sind sie einfacher zu warten und besser zu betreuen. Somit sind alle Voraussetzungen für ein gutes Funktionieren der Anlage gegeben. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse ist aus diesem Grunde fraglich.

Im Rahmen dieser Arbeit werden industriell gefertigte Großtrockner mit einer Kapazität von je 10 t grünem Tabak, die in einer Dreiergruppe zusammengeschlossen sind, betrachtet. Dieses System ist seit 1979 in Salta (Nordargentinien) in Betrieb. Um den Tabakpflanzern die Umstellung auf die Nutzung der Sonnenenergie zu erleichtern, wurden die konventionellen Trockner beibehalten, zusätzlich aber mit einem Luftkollektor-Speicher-System ausgerüstet.

Da in Argentinien Tabak in den Monaten Dezember bis März getrocknet wird, sind Untersuchungen über das Betriebsverhalten der Gesamtanlage nur während dieser Zeit durchführbar. Aufgrund der gewerblichen Nutzung der Trockner (eine Trocknerfüllung erbringt einen Ertrag von ca. 4500 DM) wird von dem Betreiber ein Standardtrocknungszyklus vorgegeben, der auch bei Solarbetrieb eingehalten werden muß und Experimente mit dem Gesamtsystem nur in begrenztem Rahmen erlaubt. Da es sich zudem um die größte solarbetriebene Virgin-Trocknungsanlage mit insgesamt 1000 m^2 Luftkollektoren und über 300 t Kiesbettspeichern handelt, sind Modifikationen am solaren Teil des Systems nicht zuletzt aus Kostengründen nur bedingt austestbar. Mit Hilfe der C o m p u t e r - s i m u l a t i o n ist es jedoch möglich, die Betriebs- und Leistungscharakteristik unter verschiedenen Rahmenbedingungen nachzubilden und zu untersuchen.

In dieser Studie wird, ausgehend von den Arbeiten von ÖREN und ZEIGLER /25/ sowie des Technischen Komitees der amerikanischen Gesellschaft für Computersimulation (SCS) /26/,

ein pragmatischer Leitfaden entwickelt, der die Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie beschreibt und einen Zuverlässigkeitstest der Ergebnisse ermöglicht. Es werden die fünf wesentlichen Arbeitsschritte

- Systemanalyse,
- Modellbildung,
- Test des Modells auf formale und logische Konsistenz,
- Durchführung von Modellexperimenten sowie
- Analyse und Interpretation der Ergebnisse

vorgestellt, diskutiert und in dieser Reihenfolge behandelt.

Zunächst wird das für die Modellentwicklung benutzte Simulationssystem TRNSYS /27/ dargestellt und auf seine Anwendbarkeit hin überprüft. Die Arbeiten von FREEMAN et al. /28/ bieten einen Überblick über die derzeit erhältlichen Simulatoren für Solaranlagen und ihre Anwendungsmöglichkeiten. TRNSYS gilt wegen seines modularen Aufbaus allgemein als ein flexibles System mit großem Einsatzbereich. Untersuchungen im Auftrage der Internationalen Energieagentur (IEA), die verschiedene Simulatoren miteinander verglichen, bestätigen dies. /29/ Aufgrund seiner Größe von ca. 10 000 FORTRAN-Statements ist TRNSYS normalerweise nur auf Großrechnern lauffähig, für diese Arbeit wurde es jedoch durch aufwendige Overlay-Techniken so modifiziert, daß eine Implementierung auf einem 16-Bit-Rechner möglich war.

Der eigentlichen Modellentwicklung geht die Analyse der Solaranlage voraus. Es werden die wichtigsten Komponenten dargestellt, und die Qualifikation der entsprechenden TRNSYS-

Module,

Kollektor,
Speicher,
Gebläse und Leitungssystem,
Anlagenregelung und
Leckagen,

wird untersucht. Eine Gesamtqualifikation des Simulators für die Nachbildung unterschiedlicher Systeme ist von KREIDER und KREITH /30/, DICKINSON und CHEREMISINOFF /31/ und durch die IEA /29/ vorgenommen worden. Da Modelle jedoch feste Gültigkeitsbereiche für ihre Anwendbarkeit besitzen, müssen sie in jedem neuen Anwendungsfall auf ihre Qualifikation hin überprüft werden.

Die Kapazität des TRNSYS-Simulators wird bei der Nachbildung der Anlage so weit ausgeschöpft, daß das Kollektorfeld wegen seiner Komplexität nicht als eine Kombination von Einzelkollektoren, Rohrleitungen und Verbindungsteilen modelliert werden kann. Statt dessen werden die in Feldversuchen gemessenen Kennlinien für eine adäquate Wiedergabe des thermischen Verhaltens benutzt.

Die Standardkomponente Speicher kann ohne Einschränkung verwendet werden. Eine Untersuchung des von HUGHES et al. /32/ entwickelten Modells beweist dies. Das Ergebnis wird von KUHN et al. /33/ in einer vergleichenden Studie über unterschiedliche Simulationsmodelle von Speichern bestätigt.

Die Komponenten Gebläse, Rohrleitungen, Regelung, Leckagen können ebenfalls mit den Modulen aus der TRNSYS-Bibliothek simuliert werden.

Für den Trockner existiert jedoch keine Standardkomponente. Es ist festzustellen, daß er als einziger nicht mit der wünschenswerten Genauigkeit nachgebildet werden kann, weil über den komplizierten Prozeß des Wärme- und Stoffübergangs im dichtgepackten Tabakbündel keine Untersuchungen vorliegen.

Da lediglich Meßwerte über einen Standardtrockenzyklus von fünf Tagen zur Verfügung stehen, werden diese als Lastvorgabe an das Solarsystem benutzt.

Das aus diesen Komponenten entwickelte Computermodell simuliert das Verhalten eines Kollektorfeldes mit Speicher und Trockner während des gesamten Trocknungszyklus. Der Einsatz dieses Systems war ursprünglich nur für die zweite Trocknungsphase, die Blattrocknung, vorgesehen. Das zweite Kollektor-Speicher-System, dessen Betrieb für die Warmluftversorgung der Niedrigtemperaturphase, der Vergilbung, geplant war und das von argentinischer Seite gebaut wurde, wird hier nicht weiter betrachtet. Dafür sind zwei Gründe maßgebend: Zum einen wurde die Anlage wegen technischer Mängel während der letzten beiden Trocknungsperioden nicht betrieben, und zum anderen liegen nicht genügend Detailinformationen für eine Nachbildung auf dem Rechner vor.

Bevor jedoch sinnvolle Experimente mit einem Computermodell vorgenommen werden können, muß es validiert werden. Die Ergebnisse des Modells werden in einem Gültigkeitstest mit Messungen verglichen, die im Oktober und November 1982 an der Anlage durchgeführt wurden. Es wurde der Solaranlagenteil für die zweite Trocknungsstufe bei verschiedenen Betriebszuständen ausgemessen. Alle Vergleiche von Messungen und Rechnungen sind in einer Standardform /34/ mit graphischer Darstellung, Anzahl der Meßpunkte, relativem Fehler und Standardabweichung wiedergegeben.

Hauptaufgabe dieser Arbeit ist es, mit dem Modell Experimente durchzuführen, die an der realen Anlage nicht oder nur bedingt möglich sind. Untersuchungen in diesem Umfang sind bisher nicht bekannt. In den zu Beginn der Einleitung angeführten Projekten über solarunterstützte Virgin-Trocknung /3 - 10/ wird während der Trocknungsperiode schwerpunktmäßig das Anlagenverhalten ausgemessen und anschließend bewertet. Der Einfluß von Modifikationen und geänderten klimatischen Bedingungen kann nur in begrenztem Maße untersucht werden. Eine Ausnahme bildet

lediglich die Arbeit von CHANG und HUANG /2/, in der die Simulation einer Gewächshaus-Bulk-Trockner-Kombination auf einem Analogrechner beschrieben wird.

Im Rahmen dieser Studie wird die Fragestellung untersucht, wie sich das System, das ursprünglich für die zweite Trocknungsphase konzipiert war, verhält, wenn es für den gesamten Trocknungsprozeß eingesetzt wird. Bei den von den Autoren /2 - 10/ beschriebenen Anlagen wird nur ein Kollektor-Speicher-System für den gesamten Prozeß benutzt. Nur JOHNSON /10/ koppelt zusätzlich drei Trockner in der Weise, daß die Prozeßabwärme genutzt werden kann. So lassen sich Simulationsergebnisse mit den aus der Literatur bekannten Daten vergleichen. Wichtigste Betriebscharakteristiken sind der solare Deckungsanteil (SF) und der Grad der Lasterfüllung, der dem Angebot auf der Solarseite die Lastvorgabe vom Trockner gegenüberstellt.

Ausgehend von einer Basiskonfiguration, die der realen Anlage entspricht, werden mit dem Modell folgende Systemänderungen simuliert:

- Variation des Massenstroms,
- Änderung der im Trockner zirkulierenden Luftmengen sowie der Trocknerverluste,
- Auswirkungen von Leckagen,
- Einfluß unterschiedlicher Kollektorkennlinien.

Diese Varianten werden zusätzlich mit einem eigens dafür synthetisierten "Schönwetterdatensatz" gerechnet. Aus den Ergebnissen läßt sich eine Rangfolge von Maßnahmen ableiten, die am realen System durchgeführt werden sollten, um ein zufriedenstellendes Betriebsverhalten zu gewährleisten.

In einem weiteren Schritt wird der Frage nachgegangen, inwieweit die Auslegungswerte dieser Anlage von FIEBIG und STEINKEMPER /35/ sinnvoll gewählt wurden: Der Einfluß von Änderungen der Speicherkapazität sowie von Verkleinerungen und Vergrößerun-

gen der Gesamtanlage (Speicher und Kollektorfeld) auf den solaren Deckungsanteil wird bestimmt.

Obwohl der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Simulation des Gesamtzyklus - der zur Zeit realen Betriebsweise - liegt, ist es möglich, die Deckungsraten gesondert für die einzelnen Trocknungsstufen auszuwerten.

Neben der Einschränkung, daß lediglich das Solarsystem, das für die zweite Trocknungsstufe ausgelegt ist, simuliert werden kann, existiert noch eine weitere, nämlich die des vorgegebenen Trocknungszyklus.

Im Rahmen dieser Studie wird unter Zugrundelegung eines von BRANDEMUEHL und BECKMAN /36/ aufgestellten Kostenrechnungsverfahrens, das auch von der IEA /29/ empfohlen wird, abschließend eine ausführliche Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt, um aufzuzeigen, unter welchen technischen Randbedingungen (Betriebsdauer und solarer Deckungsanteil) und ökonomischen Parametern (Inflationsrate, Ölpreissteigerungen, Anlagenkosten etc.) die Investitionen für eine solche Anlage durch Betriebskosteneinsparungen ausgeglichen werden können.

2. Darstellung der Systemsimulation

2.1 Grundbegriffe der Simulation

Simulationsmodelle werden gewöhnlich dann benutzt, wenn Experimente mit dem realen System entweder nicht möglich, unökonomisch oder auch unzweckmäßig sind. Derartige Modelle dienen der vereinfachten Beschreibung realer Systeme. Sie sollen die für eine gegebene Fragestellung relevanten Eigenschaften eines realen Systems bzw. Prozesses kopieren. Was in diesem Zusammenhang unter "relevant" zu verstehen ist, hängt von der konkreten Aufgabenstellung und dem aktuellen Stand der Kenntnisse über das System ab. Der Wert der Systemsimulation ist darin zu sehen, daß sie nicht nur als Analyse-, sondern auch als Optimierungsinstrument eingesetzt werden kann.

Im folgenden werden die drei wichtigsten Grundbegriffe erläutert /37, 38, 26/:

- System

  Definierte Menge von Komponenten und den zwischen den Komponenten bestehenden Relationen.

- Modell

  Abstrakte Abbildung des betrachteten Systems.

- Systemsimulation

  Abbildung eines Systems in ein Ersatzsystem (Modell).

  Untersuchung der strukturellen und dynamischen Eigenschaften des Modells.

  Gültigkeitstests des Modells.

  Übertragung der Modellergebnisse in das reale System und ggf. Modifikation des Systems.

Wenn im weiteren von Simulation die Rede ist, so wird darunter die Computersimulation verstanden; wenn von Modellen gesprochen wird, so sind damit die im Rechner gespeicherten Programme oder Dateien gemeint. Die meisten der hier vorgestellten Konzepte können auch auf andere Arten von Simulationen und Modellen angewendet werden.

2.2 Übersicht über die Arbeitsschritte der Methode

Die Aufgabe, ein komplexes, reales System in ein Modell abzubilden, führt zwangsläufig auf das Problem festzulegen, welche Elemente des betrachteten Systems in das Modell aufgenommen werden sollen. Es wird versucht, die relevanten Einflußgrößen (Komponenten und deren Verknüpfung) des jeweiligen Systems zu bestimmen und sie in geeigneter Weise einzubringen (Systemanalyse). Dabei leitet sich die "Relevanz" ab aus dem Verhalten des Systems und aus der jeweiligen Fragestellung, die durch eine Simulation beantwortet werden soll.

Im allgemeinen ist der Prozeß der Entwicklung von Computersimulationsmodellen kein sequentieller Durchlauf festgelegter Arbeitsschritte von der Identifikation des realen Systems bis zur Validation des fertigen Modells. Vielmehr handelt es sich um einen mehrfach in sich rückgekoppelten Prozeß, bei dem sich auch unter Umständen die Reihenfolge der zu durchlaufenden Schritte ändern kann. Trotzdem lassen sich einige wesentliche Arbeitsschritte beschreiben, die in ihrer Bedeutung für den ganzen Vorgang abgrenzbar sind und auch logisch aufeinanderfolgen:

- Systemanalyse
- Abbildung des realen Systems in ein Modell
- Test des Modells auf formale und logische Konsistenz
- Durchführung von Modellexperimenten
- Analyse und Interpretation von Modellergebnissen

Die Computersimulation gilt als abgeschlossen, wenn die Ergebnisse aus den Experimenten in das betrachtete System umgesetzt werden können.

Der genaue Prozeßablauf (s. Abb. 2.1) soll nun im einzelnen kurz erläutert werden: Ausgehend von einer vorgegebenen Fragestellung muß das reale System zunächst analysiert werden.

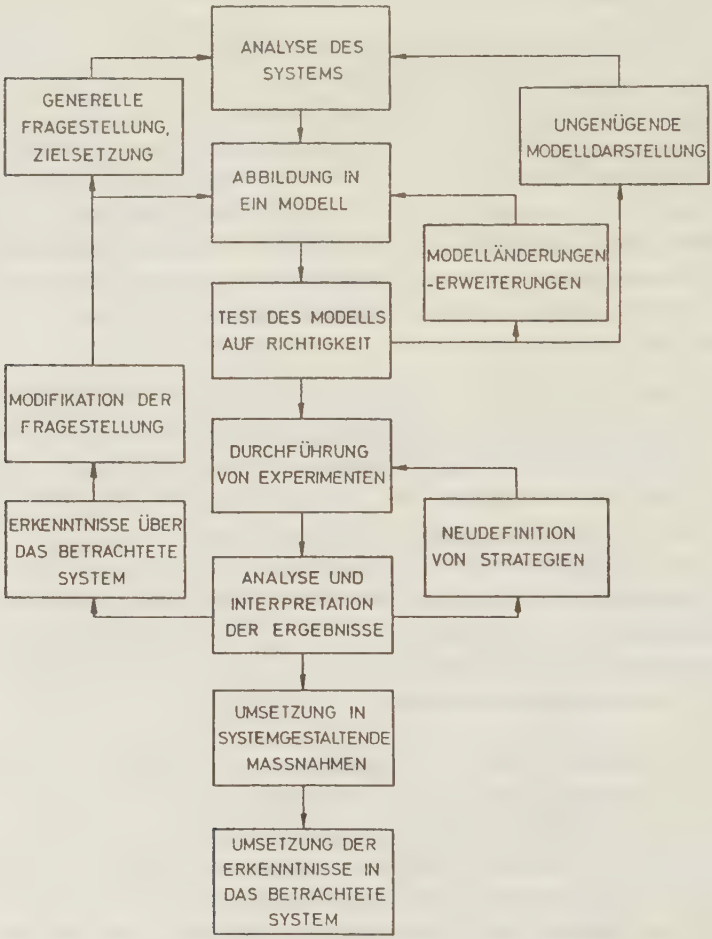


Abb. 2.1: Flußdiagramm der Systemsimulation

Im Anschluß daran beginnt der eigentliche Abbildungsvorgang, d.h. das zu betrachtende System wird in ein Computermodell übertragen. Es folgen verschiedene Tests, um die Anwendbarkeit des Modells zu überprüfen. In dieser Phase müssen möglicherweise Änderungen bzw. Erweiterungen am Modell vorgenommen werden. Wird eine ausreichende Übereinstimmung mit der Realität festgestellt, so werden im Hinblick auf die Ausgangsfragestellung erstmals Experimente durchgeführt. Die Analyse und Interpretation dieser Ergebnisse können wiederum Anlaß zu neuen Experimenten geben, evtl. sogar zu einer Modifizierung der ursprünglichen Fragestellung oder zu Korrekturen am realen System führen.

2.3 Modellentwicklung

2.3.1 Methode

Der eigentliche Abbildungsvorgang wird in vier Schritte unterteilt /39/:

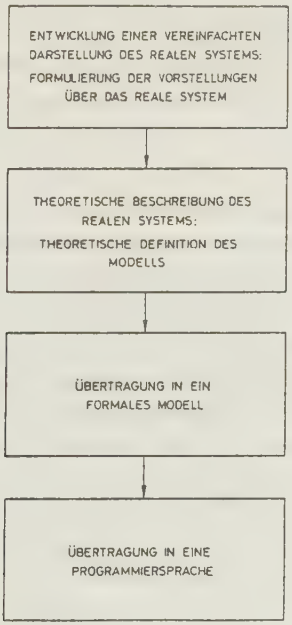


Abb. 2.2: Die vier wesentlichen Arbeitsschritte des Abbildungsprozesses

Schritt 1: Vereinfachte Darstellung des realen Systems

Um eine intensive Vorstellung von dem realen System zu erhalten, das nicht immer zugänglich ist, wird zunächst auf vereinfachte Beschreibungen, wie Zeichnungen, Photos, Skizzen etc., zurückgegriffen. Dies sollte zusammen mit Fachleuten geschehen. In dieser Phase können zum einen u.U. wichtige Daten über das System gewonnen werden, zum anderen hilft die Diskussion, Fehler in der eigenen Vorstellung über das System zu erkennen und zu beseitigen.

Schritt 2: Theoretische Beschreibung

Unter theoretischer Beschreibung wird die Bestimmung der Komponenten des Systems und ihre Verknüpfung untereinander verstanden, deren Darstellung beispielsweise durch ein Blockdiagramm erfolgen kann. Weiter gehört dazu die Definition der Ein- und Ausgangsvariablen sowie der Parameter für die Komponenten, deren notwendige Daten zu diesem Zeitpunkt möglichst verfügbar sein sollten. Die mathematische Beschreibung sowie die ihr zugrunde liegenden Annahmen der Komponenten sollten vorhanden u n d bekannt sein.

Schritt 3: Entwicklung eines formalen Modells

Während die Darstellungsmittel bei den ersten beiden Schritten hauptsächlich abhängig sind von dem betrachteten System, werden sie in den folgenden von dem benutzten Simulationssystem bzw. von der Programmiersprache bestimmt. Die Übertragung in ein formales Modell bedeutet bei der Computersimulation die Aufbereitung für die Programmierung. Bei der Benutzung einer höheren Programmiersprache wird die Beschreibung durch Flußdiagramme, Struktogramme, Eisenbahndiagramme o.ä. geschehen. Simulationssysteme geben häufig flußdiagrammähnliche Darstellungen für die formale Beschreibung vor.

Schritt 4: Übertragung in ein Computermodell

Nun wird das formale Modell in eine Programmier- oder Simulationssprache übertragen. Das so entstandene Modell muß in einem gewöhnlich langwierigen Prozeß dahingehend untersucht werden, inwieweit es noch den ursprünglichen Annahmen über das reale Modell entspricht.

Die Schritte 1 und 2 dienen also der Entwicklung des M o d e l l k o n z e p t s , wobei die eingesetzten Beschreibungsmittel abhängig sind von dem jeweils zu simulierenden System. Schritt 3 und 4 , bei denen die zu benutzenden Darstellungsmittel hauptsächlich durch die vorhandene Hard- und Software bestimmt werden, veranschaulichen dagegen den Weg vom Konzept zum C o m p u t e r m o d e l l .

2.3.2 Probleme der Modellentwicklung

Um eine gute Übereinstimmung zwischen System und Modell zu erhalten, müssen die stets auftretenden methodischen, datentechnischen und programmierungstechnischen Probleme bewältigt werden, auf die in den folgenden Abschnitten näher eingegangen wird.

Methodische Probleme

Während des gesamten Entwicklungsprozesses eines Simulationsmodells treten methodische Probleme auf, zu deren Lösung häufig Kompromisse hinsichtlich der Abbildungsmöglichkeiten oder der erwarteten Modellergebnisse geschlossen werden müssen. Insbesondere werden die methodischen Probleme bei

- der Hypothesenentwicklung,
- der Modellbildung und
- der Gültigkeitsbestimmung des Modells

skizziert.

Bei der Hypothesenentwicklung liegen im Regelfall nicht für alle Komponenten eines Modells gleich gute und genaue Theorien vor. Das führt zwangsläufig dazu, daß die Ergebnisse aus diesen Komponenten mit Unsicherheiten behaftet sind und diese durch ihre Verknüpfung mit anderen Komponenten weitergegeben werden.

Das grundsätzliche Problem bei der Modellbildung besteht in der direkten Abhängigkeit zwischen dem sogenannten Aggregationsgrad einer Modelldarstellung und der Aussagefähigkeit der erzielten Ergebnisse. Unter dem Begriff "Aggregationszustand eines Modells" wird die Zusammenfassung oder Verdichtung einer Vielzahl von Elementen zu einer Gesamtgröße verstanden. /40, 41/ Eine h o h e Aggregationsebene bedeutet in der Regel ein weniger komplexes Modell. Es enthält relativ wenige Systemkomponenten, verlangt demzufolge auch - qualitativ und quantitativ - wenige Informationen und ist deshalb schon mit einer verhältnismäßig geringen Anzahl von Daten einsetzbar. Die Konsequenz kann eine Verminderung oder Verzerrung der Aussagekraft dieses Modells sein.

Das Gegenteil davon, die Disaggregation, bezeichnet die Zergliederung einer Makrogröße in viele Elemente. Einer t i e f e n Aggregationsebene entspricht also ein sehr detailliertes (hochkomplexes) Modell mit einer weitestgehenden Annäherung der Modellstruktur an die Realität.

Das dritte methodische Problem, die Gültigkeitsbestimmung des entwickelten Modells, befaßt sich mit der Frage, inwieweit ein Simulationsmodell in seinen Eigenschaften dem abgebildeten System entspricht. /42/ Ausgangspunkt für die Modellprüfung ist der Modellentwicklungsprozeß (vgl. Abb. 2.1), in dem Fehler auftreten können. Das resultiert daraus, daß das reale System, das theoretische, das formale und das Computermodell n i e genau miteinander übereinstimmen können. Der beste Gültigkeitstest ist der Vergleich des Modell-Outputs mit den Daten des betrachteten Systems. /40/ Diese Feststel-

lung läßt jedoch nicht den Umkehrschluß zu, daß bei guter Übereinstimmung der Ergebnisse des realen Systems mit denen des Simulationsmodells die Modell-Outputs immer richtig sein müssen. Hierzu sei angemerkt, daß der Output das Resultat von Input u n d Struktur ist. Da aber die verschiedensten Strukturen denselben Output erzeugen können, sollte versucht werden, durch Überprüfung mit Inputs einen möglichst breiten, repräsentativen Bereich der real vorkommenden Zustände abzudecken, um so zumindest das Verhalten des Modells als validiert betrachten zu können. Seine Eigenschaften als Strukturmodell werden bei diesem Verfahren nicht oder nur indirekt untersucht.

Datentechnische Probleme

Im vorangegangenen Abschnitt wurde darauf hingewiesen, daß - dem Aggregationsniveau des Modells entsprechend - ein mehr oder weniger großes Datenmengengerüst notwendig ist, um Modelle konstruieren zu können, die das jeweilig vorgegebene Ziel verwirklichen. Dieses Datenmengengerüst wird eingesetzt bei

- der Analyse des abzubildenden Systems,
- der Entwicklung des Hypothesensystems,
- der formalen Modellbildung,
- der Übertragung in ein Computermodell,
- den Modelltests und
- den Modellexperimenten.

Können die für den Modellentwicklungsprozeß benötigten Daten nicht wie erforderlich beschafft werden, so müssen hinsichtlich der Modellbildung Kompromisse eingegangen werden. Dies kann bedeuten, daß z.B. die Zielsetzung des Modells geändert und die Einsatzmöglichkeiten allgemein überdacht werden müssen.

Programmierungstechnische Probleme

Ein nicht geringer Teil der programmierungstechnischen Schwierigkeiten ist in dem Vorhanden- bzw. Nichtvorhandensein von Simulationssprachen und -systemen für bestimmte Aufgabenstellungen zu suchen. Der Verzicht auf spezielle Simulationssysteme führt in der Regel zu einer beträchtlichen Ausweitung sowohl des zeitlichen als auch personellen Aufwandes bei der Programmentwicklung. Ebenso beeinflußt die vorhandene Rechenkapazität die Lösung eines Simulationsproblems stark. Bei Rechnern ohne virtuelles Betriebssystem kann die Entwicklung komplexer Overlay-Strukturen zu einem nicht zu vernachlässigenden Zeitfaktor werden. Darüber hinaus kann sich die Wortlänge, die ein Rechner besitzt, nachteilig auf die erzielbare Genauigkeit bei der Lösung numerischer Probleme auswirken. Gewährleistet sein sollte ein interaktives Arbeiten mit dem Modell, um ein rasches Testen von Strategien durchführen und mit veränderten Daten experimentieren zu können.

Nach ÖREN und ZEIGLER /25/ weisen herkömmliche Simulationstechniken, angewandt auf die Simulation und Modellierung großer Systeme, drei Hauptmängel auf:

- Sie bieten eine nur unzulängliche Mensch-Maschine-Schnittstelle sowie
- einen mangelhaften konzeptionellen Rahmen, und
- sie lassen das notwendige Instrumentarium für die Verwaltung großer Datenmengen und umfangreicher Modelle vermissen.

Ausgehend von analogen Konzepten für Modellexperimente und Untersuchungen am realen System entwickeln die Autoren einen für beide Konzepte gemeinsamen "experimentellen Rahmen" (vgl. Abb. 2.3). Für ein Computersystem wird ein Datenhaltungssystem gefordert mit vier zwar verwandten, aber genau trenn-

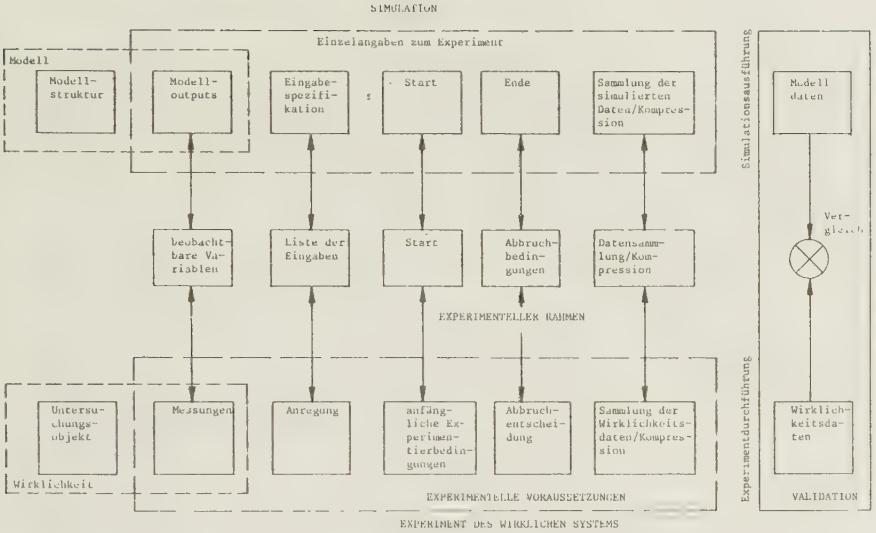


Abb. 2.3: Die Beziehungen zwischen grundlegenden Konzepten bei Simulationsexperimenten und Experimenten am realen System /25/

baren und unterscheidbaren Datenfiles, das fortschrittliche Simulationskonzepte interaktiv unterstützt (vgl. Abb. 2.4):

- Daten, die aus Messungen und Experimenten am realen System stammen;
- Modelldatei, die in zwei gesonderten Abschnitten die Modellstrukturbeschreibung und die Spezifikation des Modell-Outputs enthält;
- Daten, die Auskunft über die Struktur des realen Systems geben;
- Modelldatenfile, das die Ergebnisse der Modelluntersuchungen speichert.

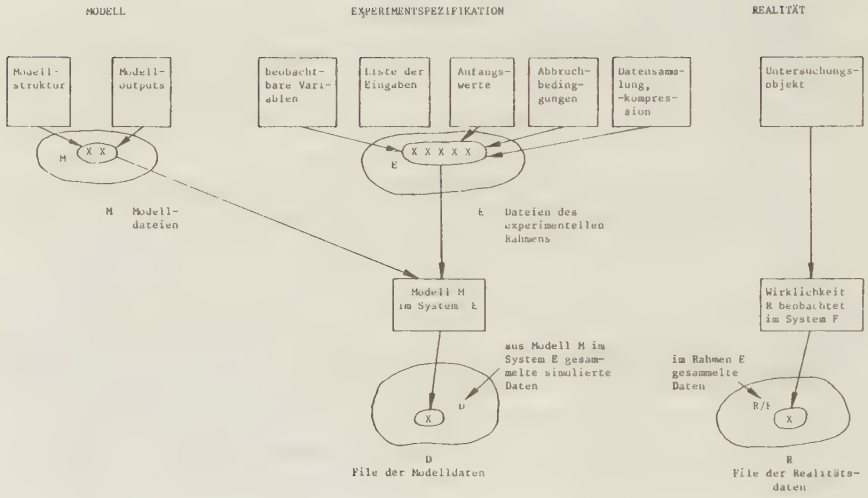


Abb. 2.4: Datengerüst /25/

Die Modellkonstruktion erfolgt modular nach einem Baukastenprinzip. Die Modelle dokumentieren sich selbst. Ein Eingreifen in die Modellstruktur während eines Rechenlaufes ist möglich.

Neue Simulationssysteme sollten in der Lage sein, selbständig die Verifikation der mit ihnen gebildeten Modelle vorzunehmen und die Validierung des Modells zu unterstützen. Inwieweit diese Forderungen bei vorhandenen Simulatoren erfüllt sind, wird später zu untersuchen sein.

2.4 Die Gültigkeitsbestimmung des Modells

Bei der Diskussion der bei der Modellentwicklung auftretenden Probleme wurde die Gültigkeitsbestimmung bereits angesprochen. Sie ist eng mit dem Modellentwicklungsprozeß verknüpft. Für die Untersuchung der Glaubwürdigkeit und Gültigkeit gibt es z.Z. keine standardisierten Konzepte. Die in der Literatur geführten Konzeptdiskussionen bewegen sich häufig auf philosophischer Ebene /40, 42, 43, 44/ und besitzen wenig praktischen Wert. Es ist das Verdienst des Technischen Komitees der Gesellschaft für Computersimulation (SCS), einen terminologischen Rahmen geschaffen zu haben, der in vielen Disziplinen anwendbar ist. Er wird im folgenden wiedergegeben und diskutiert.

Die Computersimulation läßt sich zweckmäßigerweise in drei grundlegende Elemente, wie sie in Abb. 2.5 dargestellt sind, aufteilen. Die inneren Pfeile beschreiben Prozesse, die die Elemente miteinander verbinden, die äußeren Pfeile beziehen sich auf Prozeduren, die die Glaubwürdigkeit dieser Prozesse beurteilen. Der folgende Satz von Definitionen beschreibt die Beziehung dieser Elemente untereinander /26/:

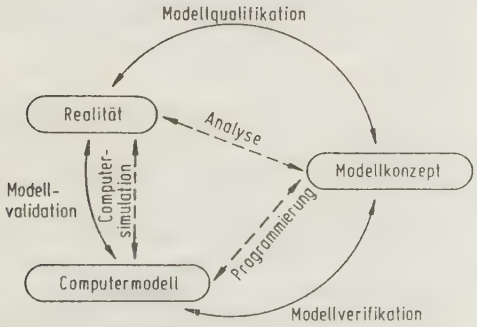


Abb. 2.5: Elemente der Computersimulation und ihre Verknüfpung untereinander

Realität	Situationen oder Systeme, die für die Analyse ausgewählt worden sind.
Modellkonzept	Verbale Darstellung, Gleichungen, bestimmende Beziehungen oder Naturgesetze, die die Beschreibung von "Realität" beinhalten.
Bereich der beabsichtigten Anwendbarkeit des Modellkonzepts	Vorgegebene Bedingungen, für die das "Modellkonzept" an die "Realität" angeglichen werden soll.
Grad der Übereinstimmung des Modellkonzepts	Erwartete Übereinstimmung zwischen dem "Modellkonzept" und der "Realität", gleichbedeutend mit dem "Bereich der beabsichtigten Anwendbarkeit" und dem Zweck, für den das Modell entwickelt wurde.
Modellqualifikation	Bestimmung der Angemessenheit des "Modellkonzepts", um einen akzeptierbaren "Grad der Übereinstimmung" für den "Bereich der beabsichtigten Anwendbarkeit" zu erreichen.
Computermodell	Ein lauffähiges Computerprogramm, das ein "Modellkonzept" implementiert.
Modellverifikation	Beweis, daß ein "Computermodell" ein "Modellkonzept" innerhalb bestimmter Grenzen der Richtigkeit repräsentiert.
Bereich der Anwendbarkeit des Computermodells	Vorgegebene Bedingungen, für die das Rechenmodell ausgetestet, mit der "Realität" verglichen und für den Gebrauch als geeignet befunden wurde (durch "Modellvalidation", wie nachstehend beschrieben).
Gültigkeitsbereich des Computermodells	Beschriebene Übereinstimmung zwischen dem Rechenmodell und der "Realität" innerhalb des "beabsichtigten Bereichs der Anwendbarkeit".
Modellvalidation	Feststellung, daß ein Rechenmodell einen zufriedenstellenden Grad der Richtigkeit innerhalb des "beabsichtigten Anwendungsbereichs" besitzt.
Zulassungsdokumentation	Zusammenfassende Leistungsbeschreibung, deren Aufgabe es ist, Informationen über die Modellgültigkeit und -anwendbarkeit mitzuteilen, und die zumindest folgende Grundelemente enthalten soll: o Darlegung des Zwecks, für den das Modell entwickelt wurde; o verbale und/oder analytische Beschreibung des "Modellkonzepts" und "Computermodells"; o Spezifikation des Anwendungs- und Genauigkeitsbereichs bezüglich des für das Modell beabsichtigten Zwecks; o Beschreibung der für die Modellnachprüfung und -gültigkeit benutzten Tests und Diskussion ihrer Angemessenheit.
Modellzulassung	Anerkennung der "Zulassungsdokumentation" durch den Modellbenutzer als angemessenen Beleg dafür, daß das "Computermodell" sinnvoll für eine bestimmte Anwendung genutzt werden kann.
Computersimulation	Ausführung eines getesteten und zugelassenen "Computermodells", um einen Einblick in die "Realität zu erhalten.

Die drei wichtigsten Schritte zur Beurteilung eines Computermodells sind hiernach

- die Modellqualifikation,
- die Modellverifikation und
- die Modellvalidation,

die nun im einzelnen erläutert werden sollen.

Bei der Modellqualifikation wird untersucht, inwieweit das Modellkonzept zur Lösung der Aufgabe geeignet und in der Lage ist, die vorgegebene Realität zu beschreiben. Diese Untersuchung muß bei sämtlichen Komponenten eines Modells durchgeführt werden. Da aber häufig nicht für alle Komponenten gleich gute Konzepte vorhanden sind, wirkt sich dies negativ auf das Gesamtmodell aus.

Die Verifikation weist nach, daß das Modellkonzept richtig auf dem Computer implementiert wurde, d.h. es wird die Korrektheit der Komponentenverknüpfungen untersucht, und es werden die Modell-Outputs auf ihre Plausibilität hin überprüft.

Die Validation besteht aus einem ausführlichen Output-Vergleich, der nach folgendem Grundmuster erfolgt:

$$\begin{pmatrix} I_S + S \rightarrow O_S \\ I_M + M \rightarrow O_M \end{pmatrix} \; O_M \approx O_S$$

Hierbei bedeuten:

I_S	System-Input
S	Struktur des realen Systems
O_S	System-Output
I_M	Modell-Input
M	Modell
O_M	Modell-Output

Die Inputs des realen Systems (I_S) werden dem Modell aufgegeben und die System- und Modell-Outputs (O_S und O_M) miteinander verglichen. Es ist darauf zu achten, daß Parameterwerte nicht dem Modell-Input, sondern der Modellstruktur zuzurechnen sind. Wenn das Modell trotz gleicher Inputs völlig abweichende Outputs erzeugt, so ist das ein Zeichen dafür, daß es sich hierbei um eine nicht zutreffende Abbildung des realen Systems handelt. Die Validität des Verhaltensmodells ist direkt proportional der Übereinstimmung der Outputs.

In dem hier dargestellten Konzept der Gültigkeitsbestimmung wird besonderer Wert auf die Zulassungsdokumentation gelegt, die zum einen festhält, welche Untersuchungen am Modell durchgeführt wurden, und zum anderen angibt, welche Experimente mit dem Modell zulässig sind. Diese Art der Leistungsbeschreibung bedeutet zwar bei der Modellerstellung einen höheren Arbeitsaufwand, erleichtert aber die Kommunikation zwischen Konstrukteur und Anwender und ermöglicht letzterem einen gezielten und effektiven Einsatz des Simulationsmodells.

2.5 Anwendungsmöglichkeiten der Systemsimulation

Es ergeben sich drei in ihrer Abfolge festgelegte Anwendungsmöglichkeiten, die kurz skizziert werden sollen:

- Systemanalyse

  Untersuchung und Quantifizierung der Zusammenhänge zwischen den Einflußgrößen, die in dem betrachteten realen System auftreten.

- Prognose des Systemverhaltens

  Ermittlung des wahrscheinlichen Verhaltens des nachgebildeten Systems unter Vorgabe angenommener Werte für die realisierten Systemvariablen bzw. der entsprechenden Zeitfunktionen für diese Größen.

► Optimierung

Sukzessive Variation der Eingangswerte der dominierenden Systemvariablen und -parameter im Hinblick auf die Ermittlung von optimalen Variablen-Parameter-Konstellationen. (Die zu optimierende Zielfunktion wird von außen vorgegeben.)

Festzustellen ist, daß Experimente an einem Computermodell - im Gegensatz zu mathematisch-analytisch lösbaren Modellen - nicht die Auffindung eines exakten oder absoluten Optimums garantieren. Trotzdem ist das Simulationsmodell bei der Bestimmung eines relativen Optimums ein unverzichtbares Mittel. Inwieweit die relativ beste Lösung einem absoluten Optimum angenähert werden kann, hängt von der Art und der Anlage der Simulationsexperimente ab. Die Simulation verspricht dort vorteilhaft zu sein, wo es um die Optimierung eines Systemverhaltens im Hinblick auf mehrdimensionale Ziele oder Zielsysteme geht und wo es nicht möglich ist, eine analytisch lösbare Zielfunktion zu bestimmen.

2.6 Simulation von Solaranlagen

Die bisher allgemein gehaltenen Ausführungen zur Simulation und Modellbildung sollen nun auf die Simulation von Solaranlagen, und dort exemplarisch auf die Nutzung der Sonnenenergie zur Trocknung von Tabak, übertragen werden. Auch hier dient die Simulation zunächst der Systemanalyse, der Prognose des Systemverhaltens und schließlich der Optimierung. Charakteristisch ist eine deutliche Trennung der ersten beiden Schritte, in denen eine thermische Analyse des Systems vorgenommen wird, vom dritten Schritt, bei dem die Optimierung immer auch eine ökonomische Analyse beinhaltet. Die thermische Analyse weist den Energiebedarf oder die Energieeinsparung aus, während die ökonomische Analyse diese sowie die Herstellungs-, Installations- und Betriebskosten in monetäre Einsparungen umsetzt.

2.6.1 Überblick über vorhandene Simulationssysteme und deren Einsatzmöglichkeiten

Eine genaue und übersichtliche Klassifikation der z.Z. bekannten Simulationsverfahren existiert nicht. Vorschläge sind von BRUNO und KERSTEN /45/ vorgelegt worden, die eine Einteilung anhand des Modellansatzes vornehmen. Aber auch HUGHES, LITTLE, SERI /46, 47, 48/ ermöglichen einen Überblick über vorhandene Programme. Aufgrund der Vielzahl und der fließenden Übergänge in bezug auf deren Komplexität wird von FREEMAN et al. /28/ eine Grobeinteilung nach "vereinfachten" Verfahren, statischen Charakters, und "komplexen" Verfahren, die als dynamisch bezeichnet werden, vorgenommen. Anhang 1 zeigt die bei LITTLE aufgeführten Verfahren, geordnet nach den von FREEMAN et al. /28/ aufgestellten Gesichtspunkten. Diese Darstellungen verdeutlichen, daß die Skala der möglichen Verfahren von ganz simplen Berechnungen bis hin zu den kompliziertesten Programmen reicht, die allein auf Großrechnern ablauffähig sind. Entsprechend unterschiedlich sind auch ihre Fähigkeiten. Die meisten Verfahren sind allerdings nur in der Lage, das thermische Verhalten von standardisierten solaren Warmwasserbereitern und Anlagen für die Hausheizung vorauszusagen. Die großen Simulationssysteme, die modular aufgebaut sind, können dagegen verschiedenste Anwendung finden.

2.6.2 Der TRNSYS-Simulator

Bei der Computersimulation stellt sich zu Beginn einer Studie jeweils die Frage, ob ein Simulationsprogramm neu entwickelt werden muß oder ob auf bereits erhältliche Systeme zurückgegriffen werden kann, die dem spezifischen Problem angepaßt werden. Bei dem breiten Angebot an fertigen Simulatoren (Anhang 1) ist es derzeit nicht mehr notwendig, für die Nachbildung von Solaranlagen in jedem Einzelfall einen neuen Simulator zu erstellen, was eine erhebliche Arbeitseinsparung bedeutet.

Modulare Simulationssysteme haben prinzipiell den gleichen Aufbau (vgl. Abb. 2.6): Ein Input-Modul liest die Struktur des zu simulierenden Systems ein, es gibt die Information an den Executor weiter, der nacheinander die notwendigen Einzelkomponenten oder Subsysteme aufruft. Die Koordination übernimmt ein Strukturprozessor, der auch die Funktionen des Output-Moduls regelt.

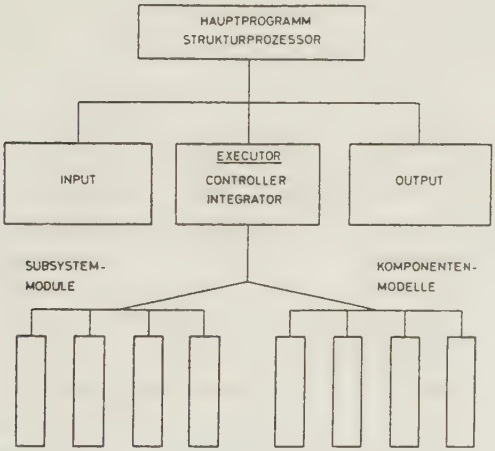


Abb. 2.6: Prinzipieller Aufbau eines modularen Simulationssystems

In dieser Untersuchung wird das Simulationssystem TRNSYS (Transient Simulation Program) eingesetzt, das kurz dargestellt werden soll. TRNSYS ist ein vielbenutztes modulares Simulationssystem für die Nachbildung von Solaranlagen. Das Programm wird herausgegeben, weiterentwickelt und gewartet vom Solar Energy Laboratory, University of Wiscosin-Madison /27/.

Abbildung 2.7 verdeutlicht die Struktur von TRNSYS. Der Input-Teil besteht aus mehreren Modulen. Die Einlesekomponente (READIN) liest die Modelldatei ein und führt eine Teilverifikation durch: Es wird untersucht, ob die Komponentenverbindungen formal richtig verknüpft sind und ob die Anzahl der In- und Outputs sowie der Parameter korrekt ist. Werden während des Einlesens Unstimmigkeiten festgestellt, so wird der Simulationslauf mit einer ausführlichen Fehlerdokumentation beendet. READIN wird durch einen Entschlüßler gesteuert, der die Modelldatei in eine Strukturmatrix überträgt, die die Verknüpfung aller Komponenten untereinander beschreibt. Nach dem Einlesevorgang wird eine interne Uhr initialisiert, und der Rechenlauf beginnt.

Die Output-Generierung und -Steuerung werden ebenfalls durch verschiedene Einzelkomponenten realisiert. Es sind mehrere Integratoren mit max. 10 Eingängen, 4 Drucker mit 10 Ausgängen, 1 Druckerplotter mit 5 Ausgängen sowie 1 Histogrammplotter verfügbar.

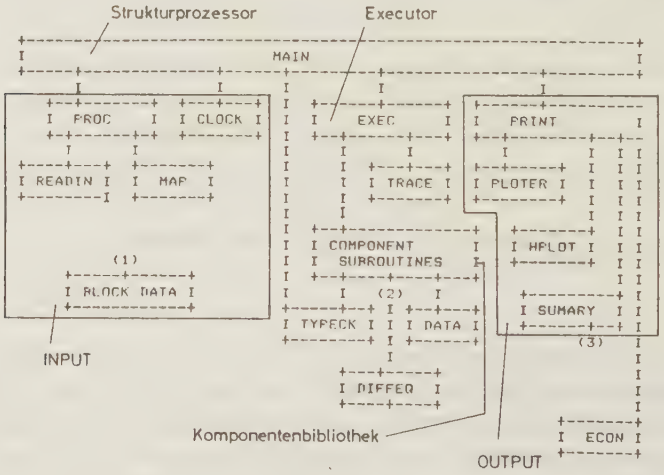


Abb. 2.7: Struktur des TRNSYS-Simulators

Wesentlicher Bestandteil dieses Simulators ist jedoch eine Bibliothek von 40 Unterprogrammen, die die wichtigsten Komponenten von Solarsystemen simulieren (Anhang 2 enthält eine Auflistung der Bibliothek). Das Programm ist in Standard-FORTRAN IV geschrieben und hat eine Länge von etwa 10 000 Statements. Der Arbeitsspeicherbedarf beträgt je nach Rechnersystem ca. 65 K-Worte. Für diese Untersuchung wurde der Simulator durch Anwendung aufwendiger Overlay-Techniken und Einschränkung auf 30 Komponenten auf 32 K-Worte verkleinert, so daß er auch auf 16-Bit-Rechnern einsetzbar ist.

Untersucht man den TRNSYS-Simulator unter dem Aspekt neuer Konzepte der Systemsimulation (vgl. Kap. 2.3.2), so kann festgestellt werden, daß hier eine Reihe guter Ansätze bereits verwirklicht ist: Die Anforderungen an das File-Handling sind insoweit erfüllt, als eine Datei für die Modellbeschreibung existiert und Möglichkeiten geboten werden, Informationen über das reale System aus Dateien einzulesen. Die Vielzahl der Komponenten gestattet eine flexible Nachbildung von Solaranlagen. Die Strukturdarstellung ist durch streng getrennte Input- und Parameterbeschreibungen äußerst übersichtlich. Durch Kommentarzeilen im Modellfile wird eine Selbstdokumentation ermöglicht. Eine Modellverifikation, die formale Fehler erkennt und meldet, erfolgt automatisch beim Einlesen durch den Strukturprozessor. Das System erlaubt es, nach intensiver Einarbeitung in die Details des Simulators eigene Komponenten zu entwickeln, um Besonderheiten eines Systems nachzubilden.

Bei der Validation von Modellen wird jedoch eine Systemunterstützung vermißt. Außerdem erweist sich als ungünstig, daß bei der Modelldatei keine strikte Trennung zwischen der Strukturbeschreibung und den Output-Anweisungen erfolgt und daß darüber hinaus dem File noch zusätzlich Eingabedaten angehängt werden. Statt der geforderten vier getrennten Datensätze werden diese durch nur zwei z.T. gemischte Files repräsentiert. Notwendige Änderungen an der Modellstruktur kön-

nen nicht sinnvollerweise während eines Rechenlaufs durchgeführt, sondern müssen vor- oder nachher durch ein Editierprogramm aus der Systemsoftware des Rechners vorgenommen werden.

Trotz dieser Mängel überwiegen jedoch die Vorteile, die das TRNSYS-Simulationssystem speziell hinsichtlich der zu bearbeitenden Studie und im Vergleich zu anderen Systemen bietet. Die Entscheidung wurde insbesondere durch die folgenden Faktoren bestimmt:

- Das TRNSYS-Simulationssystem ist modular aufgebaut und besitzt eine umfangreiche, den meisten Erfordernissen gerecht werdende Komponentenbibliothek.
- Es ist als FORTRAN-Quelle erhältlich, d.h. es bietet die Voraussetzungen für nötigenfalls vorzunehmende Programmänderungen sowie selbst zu entwickelnde Komponenten.
- Das TRNSYS-Simulationssystem gilt nachweislich als eines der leistungsfähigsten Systeme.

Obwohl der TRNSYS-Simulator als validiert angesehen werden kann /29, 30, 31/, ist es unabdingbar, die Modelle bei jedem neuen Anwendungsfall auf ihre Eignung zur Beschreibung des realen Systems hin zu überprüfen.

3. Systemanalyse und Modellsynthese einer solaren Trocknungsanlage

3.1 Analyse und Darstellung der wichtigsten Komponenten

3.1.1 Gesamtanlagenschema

Die in dieser Untersuchung beschriebene Trocknungsanlage dient der Heißlufttrocknung von Tabak. Sie wurde im Rahmen der deutsch-argentinischen Zusammenarbeit auf dem Gebiet der nichtkonventionellen Energienutzung in Salta (Nordargentinien) erbaut.
Die Gesamtanlage (vgl. Abb. 3.1) besteht aus drei separaten Tabaktrocknern für die Heißlufttrocknung heller Virgin-Tabake. Die Trockner sind mit einer konventionellen Ölheizung ausgestattet und fassen max. je 10 t frisch geernteten Tabak. Des weiteren gehören zu der Anlage zwei unterschiedliche Kollektor-Speicher-Untersysteme, die für die verschiedenen Temperaturniveaus bei der Trocknung ausgelegt sind (vgl. Schemadarstellung Abb. 3.2, S. 35), sowie ein Regelungssystem, das dafür sorgen soll, daß der solare Anlagenteil dem Trockner die erforderliche Energie zuführt, um die notwendige Temperatur mit dem richtigen Wassergehalt zu erhalten. Die Solaranlage ist also als ein Energiebereitstellungssystem zu verstehen, das versucht, einen von außen aufgegebenen Lastfall - in dem hier angesprochenen Beispiel die für die Trocknung erforderliche Luftmenge mit vorgegebener Temperatur und Feuchtigkeit - zu erfüllen. Es sind im Prinzip die unterschiedlichsten Lastvorgaben, d.h. die verschiedensten Trocknungs- oder auch Heizprozesse denkbar.

Das Solarsystem für die e r s t e Trocknungsphase, also den Niedrigtemperaturbereich (vgl. Abb. 3.5, S. 39), wurde von den Argentiniern errichtet und fällt ausschließlich in deren Zuständigkeitsbereich. Da über die konstruktiven Ein-

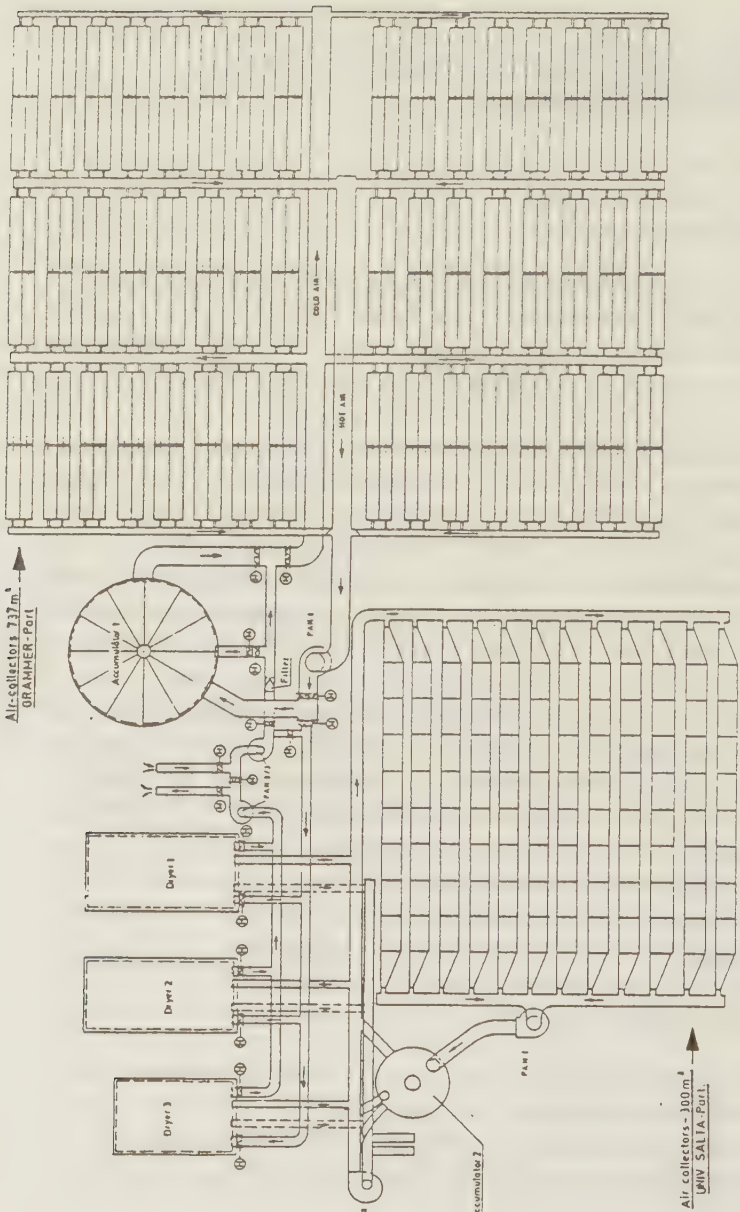


Abb. 3.1: Gesamtanlagenschema einer solarbetriebenen 30-t-Tabaktrocknungsanlage

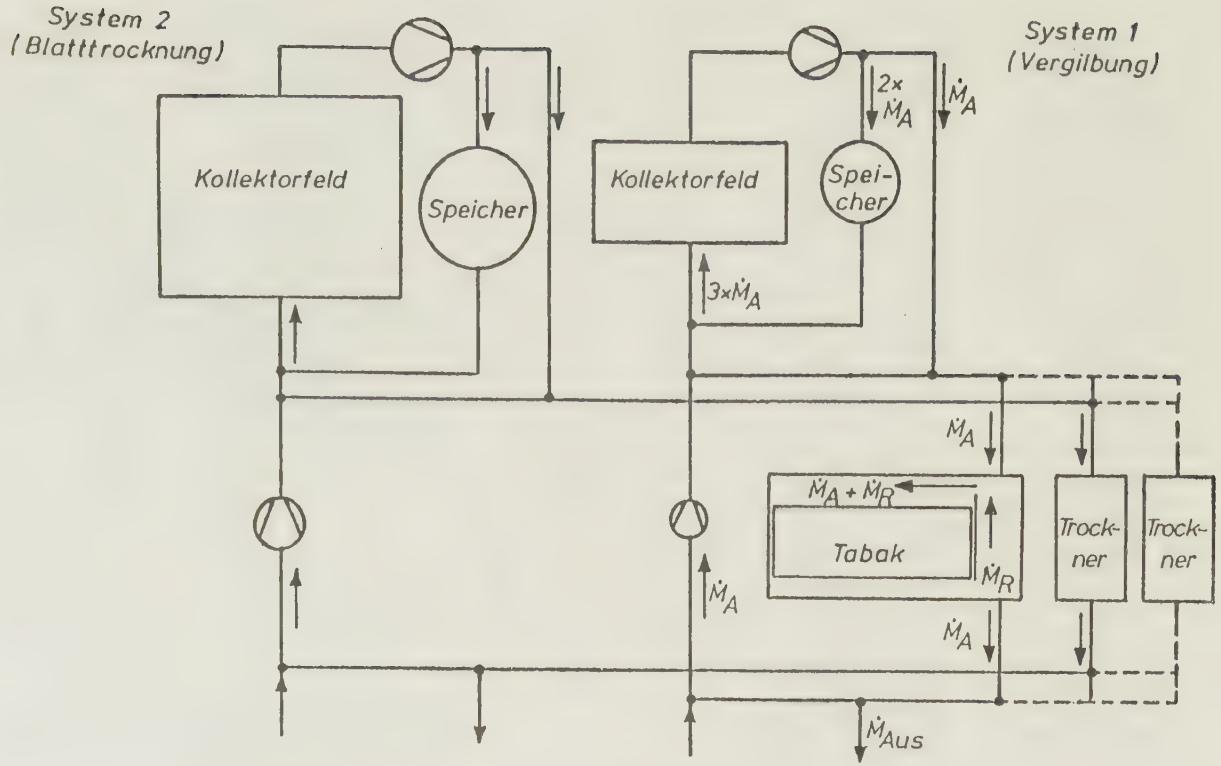


Abb. 3.2: Basisschema der solaren Tabaktrocknungsanlage

zelheiten dieses Systems für eine Nachbildung auf dem Rechner keinerlei Informationen vorliegen und die Anlage aufgrund technischer Mängel in den letzten beiden Trocknungsperioden nicht betrieben wurde, wird in dieser Arbeit nur der Anlagenteil für die z w e i t e Trocknungsstufe und seine Einsatzmöglichkeit für den g e s a m t e n Trocknungsprozeß untersucht.

Im folgenden wird das Kollektor-Speicher-System für die z w e i t e Trocknungsphase zusammen mit e i n e m Trockner analysiert (vgl. Abb. 3.3). Der Analyse folgt die Entwicklung eines Simulationsmodells und die Untersuchung der Modellqualifikation. Die wichtigsten Komponenten des Systems,

- Trockner,
- Kollektorfeld,
- Speicher,
- Leitungssystem mit Strömungsteilern, Verbindungsstücken, Bypass und Gebläse sowie
- Regelung,

sind aus Abbildung 3.4 (S. 38) ersichtlich und werden in der genannten Reihenfolge behandelt. Dies geschieht nach dem in Kapitel 2.2 angegebenen Schema: Zunächst wird die Einzelkomponente mit den über sie vorhandenen Informationen dargestellt, dann folgt eine Beschreibung des numerischen Modells, wie es in TRNSYS programmiert ist. Schließlich werden die dem Modell zugrunde liegenden Annahmen formuliert, und es wird - soweit möglich - eine Abschätzung der Modellgenauigkeit vorgenommen.

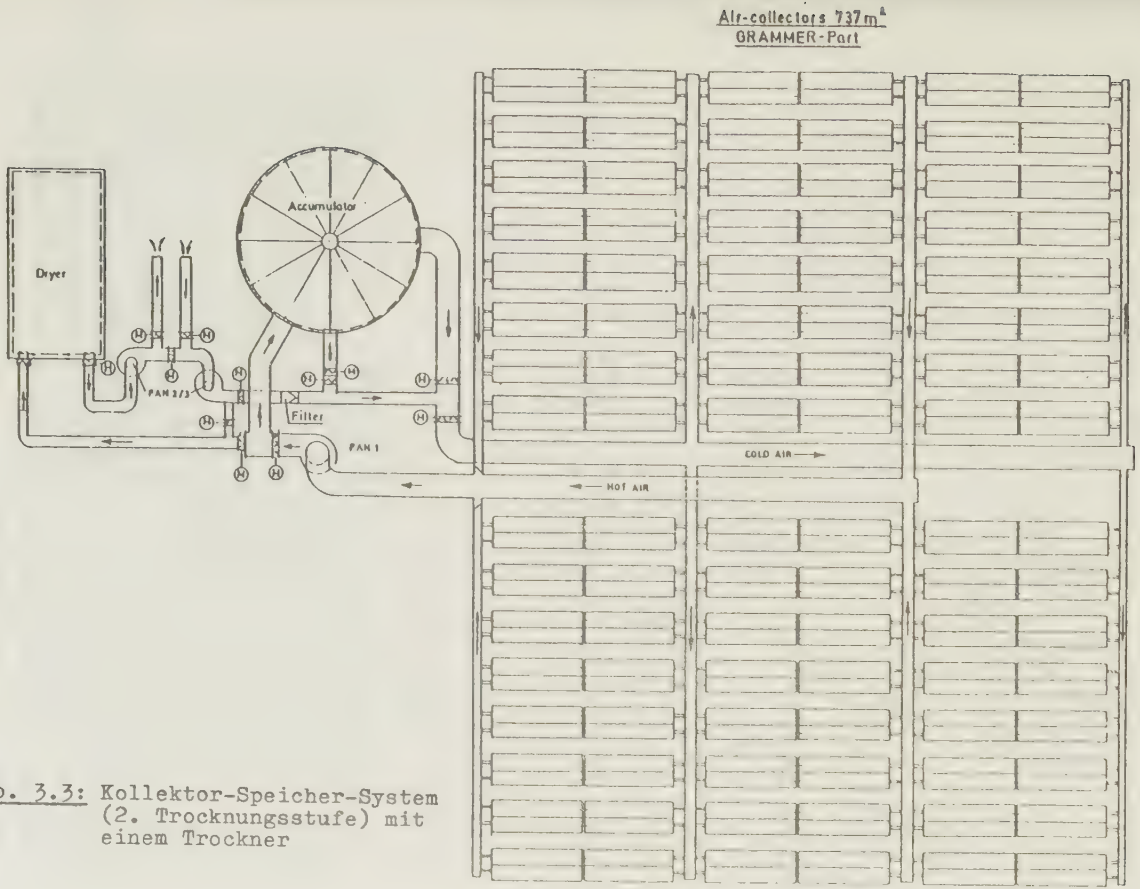


Abb. 3.3: Kollektor-Speicher-System (2. Trocknungsstufe) mit einem Trockner

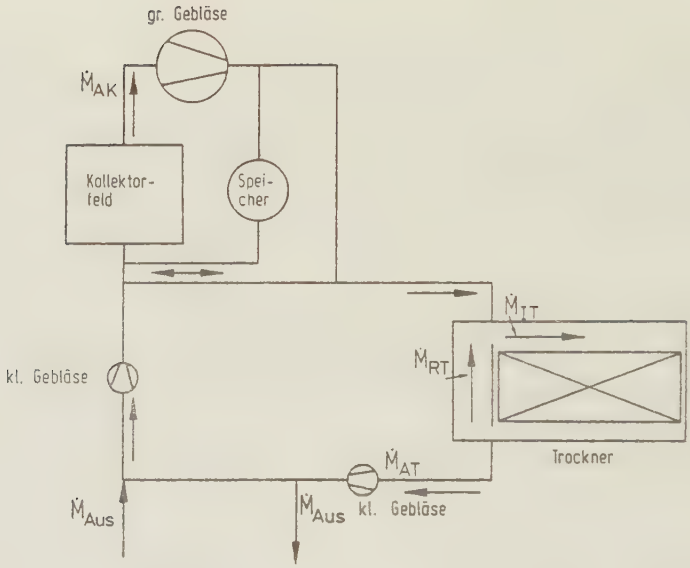


Abb. 3.4: Schema des Kollektor-Speicher-Systems mit einem Trockner

3.1.2 Der Trockner

a) Der Trocknungsprozeß

Das in Argentinien angewandte Verfahren der Heißlufttrocknung bildet mit den dazu speziell gebauten Trocknungshäusern den für das Kollektor-Speicher-System vorgegebenen Lastfall. Getrocknet wird der Tabaktyp Virgin (Spezies: Nicotiana tabacum). Die Trocknungsdauer beträgt je nach Reifezustand des Ernteguts etwa fünf Tage. Der Wassergehalt des Tabaks wird dabei von 90 % auf 7 bis 8 % reduziert. Der Trocknungsprozeß - Vergilbung, Blatttrocknung, Rippentrocknung - läuft in drei Stufen ab und ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Dieser Trocknungszyklus gilt international als Standardverlauf und ist aufgrund langjähriger praktischer Erfahrungen der Pflanzer entwickelt worden.

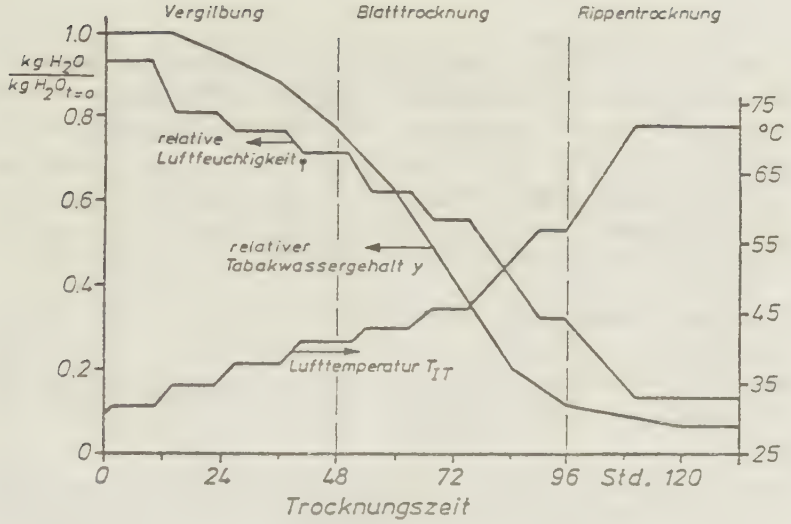


Abb. 3.5: Trocknungsprozeß: Lufttemperatur, relativer Tabakwassergehalt und relative Luftfeuchtigkeit vor dem Tabak bei der Heißlufttrocknung

Während der maximal zweitägigen Vergilbungsphase wird die Temperatur der Trocknungsluft auf ca. 40° C gesteigert. Wichtig ist, daß die Luftfeuchtigkeit im Trockner hoch gehalten wird und der Wassergehalt des Tabaks nicht unter 75 % des Anfangswassergehalts sinkt. Innerhalb dieser Trocknungsphase wird durch das Ferment Chlorophyllase das gesamte Blattchlorophyll abgebaut und Wasser freigesetzt. Dieser Vorgang erfolgt in einem engen Feuchte- und Temperaturintervall, dessen Bandbreite z.Z. noch nicht erforscht ist. Wird dieser Trocknungsabschnitt zu schnell durchlaufen, so wird das Blatt flekkig, da ab einem bestimmten Wassergehalt im Blatt kein Chlorophyll mehr abgebaut wird. Der Tabak verliert seinen Marktwert und ist nicht mehr zu verkaufen. Vollzieht sich der Vergilbungsprozeß dagegen zu langsam, so finden noch zusätzlich andere chemische Umsetzungen statt, die u.a. zu einem Substanzverlust des Blattes und ebenfalls zu finanziellen Einbußen führen.

Gegen Ende der Vergilbungsphase hat sich die Blattfarbe von grün in ein gleichmäßiges Gelb verändert. Das spätere Tabakaroma ist bereits vorgeprägt. Während der nächsten zwei Tage läuft der eigentliche Trocknungsprozeß, die Blatttrocknung, ab. Durch Temperaturerhöhungen bis zu 55° C und Absenkung der Luftfeuchte auf 50 bis 60 % werden die biochemischen Vorgänge gebremst, und die spätere Tabakfarbe wird fixiert.

Die letzte Phase dient der Trocknung des noch immer feuchten Blattstieles sowie der Rippen. Die Temperaturen werden bis auf 70° C erhöht, und die relative Feuchtigkeit vor dem Tabak wird auf ca. 15 % gesenkt.

Der Trocknungsprozeß von hellem Virgin-Tabak gilt zu Recht als der schwierigste aller landwirtschaftlichen Trocknungsprozesse, da Feuchtigkeit und Temperatur aufeinander abgestimmt und kontrolliert werden müssen, um ein marktfähiges Trocknungsprodukt zu erhalten.

b) Trocknerhaus

Für die Heißlufttrocknung hat sich seit Anfang der 70er Jahre ein in den USA entwickeltes Verfahren, das Bulk-Curing, durchgesetzt. Hierbei wird der frisch geerntete Tabak dicht gepreßt auf sogenannte Racks gespießt, die auf Schienen in den Trockner geschoben werden. Die Größe der Trockner richtet sich nach der jeweiligen Anbaufläche des Pflanzers. Um eine gleichmäßig gute Auftrocknung zu erzielen, darf nur der Tabak e i n e r Erntestufe in einem Zyklus getrocknet werden. Je nach Bauweise wird entweder die zirkulierende Luft durch zwischengeschaltete Wärmeübertrager erhitzt, oder es werden die Rauchgase des Brenners direkt in die Trockenkammer geleitet. (Abb. 3.6 zeigt die Prinzipskizze eines Bulk-Curing-Systems.)

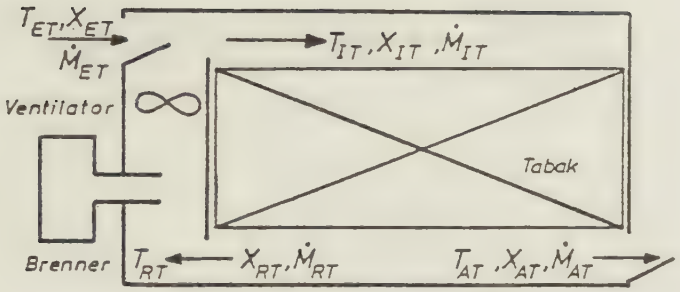


Abb. 3.6: Prinzipskizze eines Trocknerhauses

Die in Abbildung 3.5 dargestellten Verläufe von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit sind an der Stelle I (Innen) gemessen worden. Durch ein Gebläse wird die Luft von oben nach unten durch den Tabak gepreßt. Sie entzieht dem Tabak Wasser und kühlt sich ab. Je nach Trocknungszustand wird zur Feuchteregulierung ein Teil der Luft an der Stelle A (Auslaß) ins Freie gelassen. Der Rest wird durch den eingebauten Ventilator umgewälzt und an der Stelle I mit der durch den Eintritt (E) einströmenden Frischluft vermischt. Bei Bedarf kann die Luft durch den eingebauten Ölbrenner wieder auf die für die jeweilige Trocknungsphase erforderliche Temperatur erhitzt werden.

Bei konventioneller Trocknung werden ca. 10 kg grüner Tabak benötigt, um 1 kg getrocknetes Gut zu erhalten. Für diesen Wasserentzug wird beim Bulk-Curing ungefähr 1 kg Öl verbrannt. Ausgehend von den standardisierten Trocknungshäusern, die je 10 t frisch geernteten Tabak aufnehmen können und in Dreiergruppen zusammengefaßt sind, ergibt sich ein Leistungsbedarf für die Trocknung, wie er der Abbildung 3.7 /49/ zu entnehmen ist. Die Messungen des Brennstoffverbrauchs für die Trocknung liegen etwa 1,5mal höher als die für den Wasserentzug errechnete Energie. Der Energiebedarf für die Verdampfung von 8500 kg

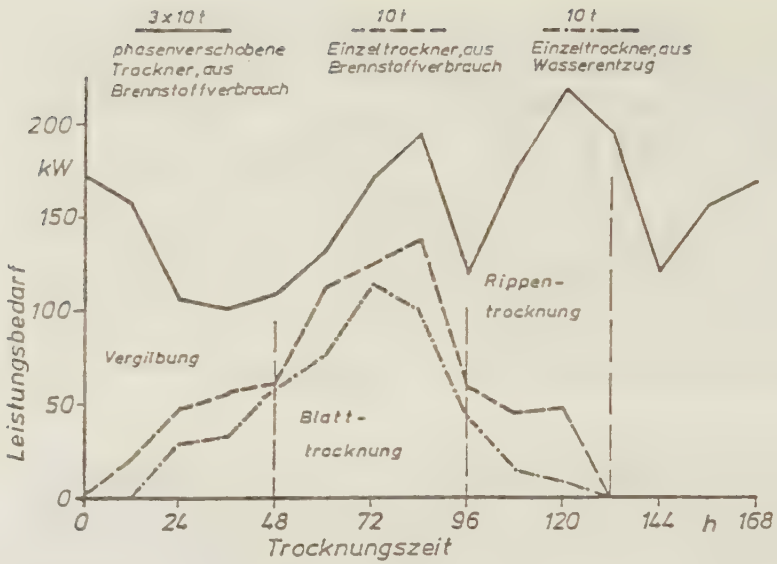


Abb. 3.7: Leistungsbedarf für die Trocknung von 10 (bzw. 30) t feuchtem Tabak /49/

Wasser aus 10 000 kg frischem Tabak beträgt bei einer mittleren Verdampfungsenthalpie von 2400 kJ/kg

$$Q_{theor} = 2{,}04 \cdot 10^7 \text{ kJ}.$$

Aus den Messungen ergibt sich jedoch ein realer Energiebedarf von

$$Q_{real} = 3{,}05 \cdot 10^7 \text{ kJ}$$

(s. Abb. 3.8), der zurückzuführen ist auf Verluste durch unzureichend isolierte Wände, kapazitive Einflüsse des Trockners und des Tabaks sowie Luftleckagen und schlechte Prozeßführung, die im folgenden diskutiert werden.

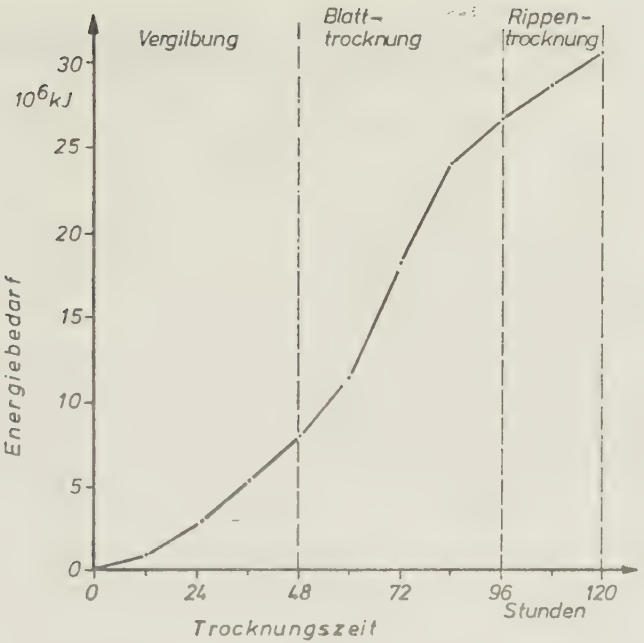


Abb. 3.8: Gemessener Energiebedarf bei der Trocknung von 10 t feuchtem Tabak

Über die gesamte Hüllfläche des Trockners von 160 m^2 wird Wärme abgegeben. Die Wände bestehen aus 2,5 mm dickem verzinktem Stahlblech, das mit nur 5 cm Mineralwolle isoliert ist. Die Wärmeleitfähigkeit des Isoliermaterials beträgt 0,0346 W/(m K). Die Gleichung für den Wärmeverluststrom lautet:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T_m,$$

dabei bedeutet A die Hüllfläche und ΔT_m die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Umgebungs- und Trocknerinnentemperatur, die mit 30 K angesetzt wird. Der k-Wert beträgt unter der Annahme, daß der Wärmewiderstand des Metalls vernachlässigt werden kann und die Wärmeübergangszahlen innen und außen

je 28 W/(m^2 K) betragen, 0,66 W/(m^2 K). Der Verlustwärmestrom läßt sich damit zu 3,168 kJ/s bestimmen. Das sind umgerechnet auf einen fünftägigen Trockenzyklus $1{,}37 \cdot 10^6$ kJ.

Kapazitive Einflüsse des Trockners lassen sich aus den Kapazitäten der Gesamtkonstruktion und des Tabaks berechnen. Die Konstruktion besteht zur Hauptsache aus einer Innen- und Außenhaut aus je 2,5 mm dickem Stahlblech, dazwischen befindet sich eine Mineralwolleschicht von 5 cm. Dieser Bulk-Trockner wird innerhalb von fünf Tagen von 20 auf ca. 70° C aufgeheizt. Die dazu nötige Wärmemenge beträgt 155 192 kJ.
Die für die Erwärmung des Tabaks erforderliche Energie läßt sich abschätzen unter den Annahmen, daß die spezifische Wärmekapazität des Tabaks etwa der von Wasser entspricht, die Menge des Tabaks 10 000 kg beträgt und diese in der Vergilbungsphase, während der der Wasserentzug nur gering ist, von 20° C auf zunächst 40° C erwärmt wird. Hierfür werden 836 000 kJ benötigt. Zusammen mit der Wärmemenge für die Aufheizung des Trockners ergibt dies insgesamt etwa $1{,}0 \cdot 10^6$ kJ.
Die Differenz zwischen dem theoretischen und realen Energieverbrauch beträgt $1{,}01 \cdot 10^7$ kJ und läßt sich wie folgt aufschlüsseln: Nur $2{,}37 \cdot 10^6$ kJ entfallen auf Verluste durch Wände und kapazitive Effekte, so daß die restlichen $7{,}73 \cdot 10^6$ kJ Luftleckagen und schlechter Prozeßführung zuzuschreiben sind. Über den Wärme- und Stoffübergang im dichtgepackten Tabakbündel existieren bisher keine detaillierten Untersuchungen, ebenso nicht über den Einfluß der Strömungs- bzw. Prozeßführung.

c) Modellbeschreibung

Für den argentinischen Trockner als Lastvorgabe, der an das Solarsystem die Information weiterleitet, welcher Massenstrom der Luft mit welchen Temperaturen und Wassergehalten bereitzustellen ist, wird, da derzeit nicht genügend Daten vorhanden sind, ein einfaches Rechenmodell, wie es von STEINKEMPER und FIEBIG /49/ benutzt wurde, zugrunde gelegt. Es geht von folgenden vereinfachenden Annahmen aus:

- Die Verluste und kapazitiven Einflüsse werden durch einen Verlustfaktor von 1,5 für die errechnete Wärmemenge erfaßt.
- Die aufzuwendende Energie für den Gebläseantrieb ist vernachlässigbar klein.
- Die Stoffwerte sind während des Trocknungszyklus konstant.

Über einen Standardzyklus liegen Meßwerte vor (vgl. Tab. 3.1), die in Argentinien an einem ähnlichen Bulk-Trockner aufgenommen wurden, und zwar in Abhängigkeit von der Zeit an der Stelle I im Trockner die Temperatur und der Wassergehalt der Luft, an der Stelle A die Temperatur der Luft sowie durch Wiegungen der Wasserverlust des Tabaks. Unbekannt sind die Temperatur sowie der Wassergehalt der Luft an der Stelle E, die die Lastvorgabe des Solarsystems bilden, der Energieverbrauch des Trockners sowie der Wassergehalt der Luft am Trocknerausgang.

Tab. 3.1: Meßwerte des Trocknungszyklus /50/

Zeitintervall [h]	T_{IT} [°C]	x_{IT} [kg_{H_2O}/kg_{Luft}]	$\Delta\dot{M}_W$ [kg/h]	T_{AT} [°C]
0 - 12	30,0	0,028	0	30,0
12 - 24	34,0	0,032	42,5	31,0
24 - 36	37,0	0,036	49,2	33,0
36 - 48	40,0	0,037	85,8	34,0
48 - 60	43,0	0,037	112,5	34,5
60 - 72	46,0	0,040	170,8	36,0
72 - 84	50,0	0,043	150,0	38,5
84 - 96	57,0	0,045	64,2	53,0
96 - 108	66,0	0,048	20,8	64,0
108 - 120	72,0	0,049	12,5	70,0

Ausgehend von den vorhandenen Informationen über den Trocknungszyklus lassen sich folgende Gleichungen aufstellen:
Rezirkulierter Massenstrom im Trockner

$$\dot{M}_{RT} = \rho_T \cdot \dot{M}_{ET} \qquad (3.1)$$

$$\dot{M}_{IT} = \dot{M}_{RT} + \dot{M}_{ET} \qquad (3.2)$$

ρ_T bezeichnet die Rezirkulationsrate im Trockner, d.h. das Verhältnis von zirkulierender Luft ($\dot{M}_{RT}$) zur eintretenden Frischluft. /49/
Beim konventionellen Betrieb sind normalerweise die Luftein- und -austrittsklappen geschlossen; die Luft wird durch das interne Gebläse umgewälzt und - falls notwendig - durch den Brenner nacherhitzt. Nur wenn die Luftfeuchtigkeit im Trockner zu hoch ist, werden die Austauschklappen geöffnet, um die feuchte Abluft gegen trockene Umgebungsluft auszutauschen.
Bei Zuschalten der Solaranlage wird ein kontinuierlicher Strom vorgewärmter Luft in den Trockner eingeblasen und auf niedrigerem Temperaturniveau wieder abgeführt.
Nur bei Solarbetrieb ist also diese Definition der Rezirkulationsrate sinnvoll. Bei konventionellem Betrieb spricht man besser von einer Umwälzmenge pro Zeiteinheit, da die Luft durch den Tabak gepreßt und wieder zurückgeführt wird. Über die Umwälzmengen liegen z.Z. keine ausreichend genauen Messungen vor. Am Trockner in Salta haben lediglich erste Voruntersuchungen stattgefunden, die bei gefülltem Trockner und geschlossenen Klappen folgende Werte für den umgewälzten Luftstrom ergaben:

Konventioneller Betrieb

Volumenstrom	3730 m^3/h, $\rho_L = 0{,}855 \frac{kg}{m^3}$
Massenstrom	3190 kg/h
Trocknervolumen	124,8 m^3
Umwälzrate	29,89 Luftwechsel pro Stunde

Solarbetrieb	$\dot{M}_{ET} \approx 8000$ kg/h
Massenstrom	1913 kg/h bis 2505 kg/h
Rezirkulationsraten	$\rho_T = 0{,}24$ bis $0{,}31$

Für die Messungen der Luftgeschwindigkeit wurde eine Genauigkeit von ± 20 % angegeben. Obwohl diese Messungen ungenau sind, lassen sie jedoch die Schlußfolgerung zu, daß die schlechten Trocknungsergebnisse zum Teil auf die sehr geringe Umwälzrate des gefüllten argentinischen Trockners mit ungefähr 30 Luftwechseln pro Stunde zurückzuführen sind (an einem vergleichbaren italienischen Trockner wurde in leerem Zustand eine Luftwechselzahl von ca. 335 bestimmt). Auch bei konventionellem Betrieb wird der Tabak nur sehr ungleichmäßig aufgetrocknet. Während einige Partien bereits übertrocknet sind, beginnen andere zu faulen. Die Tabakqualität entspricht ausschließlich der Güteklasse 3 (sehr schlecht). Beim Solarbetrieb liegt die Rezirkulationsrate nicht - wie in der Basisauslegung angenommen - bei 1, sondern im Bereich von 0,2 bis 0,4. Ihr Einfluß wird an späterer Stelle noch diskutiert werden. Darüber hinaus beeinflußt die Zufuhr von Luft aus dem Solarsystem die Umwälzmenge. Ist sie bei konventionellem Betrieb mit etwa 3200 kg/h anzusetzen, so sinkt sie bei Solarbetrieb - offensichtlich aufgrund der Druckerhöhung am Trocknereintritt - auf ca. 1900 kg/h ab.

Aus der Energiebilanz an der Stelle I wird die geforderte Eintrittstemperatur berechnet:

$$T_{ET} = (\dot{M}_{IT} \cdot T_{IT} - \dot{M}_{RT} \cdot T_{AT}) / \dot{M}_{ET} \qquad (3.3)$$

Aus der Gleichung für den Wasserentzug

$$\Delta \dot{M}_W = \dot{M}_{IT}(x_{AT} - x_{IT}) \qquad (3.4)$$

und der Bilanz für Wasser an der Stelle I

$$\dot{M}_{IT} \cdot x_{IT} = \dot{M}_{RT} \cdot x_R + \dot{M}_{ET} \cdot x_{ET}, \quad x_R = x_{AT}, \qquad (3.5)$$

lassen sich x_{ET} und x_{AT} bestimmen.

$$x_{AT} = (\dot{M}_{IT} \cdot x_{IT} + \Delta\dot{M}_W)/\dot{M}_{IT} \tag{3.6}$$

$$x_{ET} = (\dot{M}_{IT} \cdot x_{IT} - \dot{M}_{RT} \cdot x_{AT})/\dot{M}_{ET} \tag{3.7}$$

Der Energiebedarf der Trocknung errechnet sich aus der Menge des verdampften Wassers, korrigiert durch den Verlustfaktor

$$\dot{Q}_T = \Delta\dot{M}_W \cdot \Delta h_V \cdot 1{,}5. \tag{3.8}$$

Die benötigte Zusatzenergie ergibt sich aus der Differenz zwischen der zur Trocknung notwendigen und der bereitgestellten Energie

$$\dot{Q}_{Zus} = \dot{Q}_T - (\dot{M}_{IT} \cdot c_{pL} \cdot (T_{IT} - T_{AT})). \tag{3.9}$$

Gleichung (3.3) zeigt den Einfluß von c_T auf die geforderte Trocknereintrittstemperatur: Eine Erhöhung der internen Rezirkulationsrate bedeutet, daß die Eintrittstemperatur ebenfalls erhöht werden muß, um die aus Messungen vorgegebene Temperatur T_{IT} halten zu können. Gleichung (3.9) ist zu entnehmen, daß eine Erhöhung von c_T, die eine Vergrößerung von $\dot{M}_{IT}$ nach sich zieht, die notwendige Zusatzenergie vermindert, vorausgesetzt, daß die anderen Variablen konstant bleiben. Wird die geforderte Temperatur T_{IT} nicht erreicht, vergrößert sich der Bedarf an Zusatzenergie.

Aus den Gleichungen ist erkennbar, daß dieses Modell nur als Lastvorgabe für das Solarsystem geeignet ist, nicht aber zur Beschreibung des überaus komplexen Trocknungsvorgangs beim Tabak. Anhand der Temperatur- und Feuchtigkeitsvorgabe durch den Trockner ist es zwar möglich, die Reaktionen des Solarsystems, Erfüllung oder Nichterfüllung einer zu erbringenden Last festzustellen, Änderungen des Trocknungsvorgangs aufgrund unterschiedlicher Prozeßführungen sind jedoch nicht erfaßbar.

Der Wasserentzug ist durch Meßdaten vorgegeben, und bei Unterschreiten der Solltemperatur schaltet sich der Brenner automatisch zu. Die Nichteinhaltung des Wassergehaltes der Luft am Trocknereintritt beeinflußt in diesem Modell nur den rechnerischen Wert des Wassergehaltes am Austritt (vgl. Gl. (3.6) und (3.7)).

Die Problematik dieser Lastvorgabe wird deutlich, wenn der Datensatz der Tabelle 3.1 mit den Gleichungen (3.8) und (3.9) auf seine Konsistenz hin überprüft wird, was im folgenden geschehen soll.
Bei Einhalten der Temperatur T_{ET} (Gl. (3.3)) durch das Solarsystem dürfte die Zusatzheizung nicht anspringen, da die Vorgabetemperatur T_{IT} ebenfalls eingehalten wird. Dies ist jedoch nicht der Fall. Werden für den gesamten Zyklus in Gleichung (3.9) die Werte von $\dot{Q}_T$ (Gl. (3.8)) eingesetzt und wird mit $\dot{M}_{IT}$ = 16 200 kg/h (Sollmassenstrom) /51/, c_{pL} = 1,012 kJ/(kg K) und den entsprechenden Temperaturen aus Tabelle 3.1 der Zusatzwärmestrom berechnet, so ergeben sich immer Werte, die größer als 0 sind (s. Tab. 3.2; Differenz aus Spalte 4 und 5). Soll die Bedingung, daß bei ordnungsgemäßem Betrieb der Solaranlage keine Zusatzheizung erforderlich ist ($\dot{Q}_{Zus}$ = 0), erfüllt werden, so müssen die Vorgabedaten aus Tabelle 3.1 geändert werden. Es kann davon ausgegangen werden, daß die angegebenen Raten für den Wasserentzug richtig sind und daß sie - eingesetzt in Gleichung (3.8) - korrekte Werte erbringen. Dies wird durch Vergleiche mit Messungen der Landesanstalt für Pflanzenbau und Tabakforschung in Forchheim /52/ bestätigt. Spalte 4 in Tabelle 3.2 weist - aufsummiert und mit dem Zeitintervall von 12 Stunden multipliziert - einen Energieverbrauch von $3{,}06 \cdot 10^7$ kJ entsprechend einem Ölverbrauch von 0,84 l pro kg trockenem Tabak für die Trocknung von 10 t frischem Tabak aus. Unter der Voraussetzung, daß die Solaranlage die Lastvorgabe zu 100 % erfüllt, ergeben sich die in Spalte 6 (Tab. 3.2) aufgelisteten Vorgabetemperaturen T_{ET} und T_{IT}. Weiterhin ist davon auszugehen, daß der Massenstrom $\dot{M}_{IT}$ während des gesamten Trocknungszyklus konstant bleibt.

Tab. 3.2: Energieverbrauch und Temperaturen während des Standardtrocknungszyklus

1	2	3	4	5	6		7		8		9	10	
Zeitintervall [h]	T_{AT} [°C]	$\Delta\dot{M}_W$ [kg/h]	$\dot{Q}_T$* [kJ/h]	$\dot{Q}_{real}$ [kJ/h]	$\dot{M}_{IT}$ = 16 200 Vorgabe T_{ET} [°C]	T_{IT}	$\dot{M}_{IT}$ = 16 200 Sollwerte T_{ET} [°C]	T_{IT}	$\dot{M}_{IT}$ = 11 200 Sollwerte T_{ET} [°C]	T_{IT}	$\dot{Q}_T$ ohne Verluste [kJ/h]	$\dot{M}_{IT}$ = 16 200 Sollwerte T_{ET} [°C]	T_{IT}
0 - 12	30,0	0	0	0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	0	30,0	30,0
12 - 24	31,0	42,5	153.000,0	49.183,2	34,7	34,0	42,6	40,3	49,5	44,4	102.000,0	38,7	37,2
24 - 36	33,0	49,2	177.120,0	65.577,6	38,0	37,0	46,4	43,8	54,8	48,6	118.800,0	42,0	40,2
36 - 48	34,0	85,8	309.240,0	98.366,4	41,5	40,0	57,4	52,8	72,1	61,2	206.160,0	49,7	46,6
48 - 60	34,5	112,5	405.000,0	139.352,4	45,1	43,0	65,3	59,2	84,5	70,2	270.000,0	55,0	51,0
60 - 72	36,0	170,8	615.240,0	163.944,0	48,5	46,0	82,7	73,5	111,9	90,2	410.160,0	67,1	61,0
72 - 84	38,5	150,0	540.000,0	188.535,6	52,8	50,0	79,5	71,4	105,1	86,1	360.000,0	65,9	60,5
84 - 96	53,0	64,2	231.120,0	65.577,6	58,0	57,0	70,6	67,1	82,4	73,3	154.080,0	64,7	62,4
96 - 108	64,0	20,8	74.880,0	32.788,8	66,5	66,0	69,6	68,5	73,2	70,6	49.920,0	67,7	67,0
108 - 120	70,0	12,5	45.000,0	32.788,8	72,5	72,0	73,4	72,7	75,5	73,9	30.000,0	72,2	71,8

* s. Gleichung 3.8

So läßt sich der wirkliche Wärmestrom $\dot{Q}_{real}$ berechnen, dessen Ergebnisse in Spalte 5 aufgeführt sind. Für den gesamten Zyklus beträgt die erbrachte Wärmemenge $1{,}003 \cdot 10^7$ kJ. Das bedeutet, daß - selbst wenn die Lastvorgabe erfüllt ist - noch ca. $2{,}057 \cdot 10^7$ kJ zugeheizt werden müssen und der solare Dekkungsanteil (SF) bei ca. 33 % liegt. Auch wenn es sich hierbei nur um eine überschlägige Rechnung handelt, zeigt sich jedoch, daß die Temperaturvorgaben für die Regelung korrigiert werden müssen. Den Spalten 7 und 8 (Tab. 3.2) sind für verschiedene Massenströme die geänderten Sollwerte für T_{ET} (Gl. (3.3)) und T_{IT} (Gl. (3.9)) zu entnehmen, um $\dot{Q}_{Zus} = 0$ zu erhalten. Vergleicht man nun die Vorgabewerte T_{ET} und T_{IT}, so ergibt sich eine Übereinstimmung mit den Messungen der Landesanstalt für Pflanzenbau und Tabakforschung /52/ an einem Trocknungszyklus von Virgin-Hauptgut. Die Trocknungszeit beträgt wegen der kräftigen Blätter mit dicken Stengeln sechs Tage. Die Temperaturen, die im Bereich von ca. 30 bis 70° C liegen, sind mit dem in der Anlagenregelung eingebauten Meßfühler registriert worden, der in der Mitte, zwischen den Stellen I und A (Abb. 3.6), im Tabakbündel angebracht ist und deshalb eine "mittlere" Tabaktemperatur wiedergibt, nicht aber die Temperatur der Luft vor dem Tabak.

Diese Rechnungen wurden mit der vereinfachenden Annahme durchgeführt, daß die Verluste als gleichverteilt über den gesamten Zyklus angenommen werden. Sie sind jedoch temperaturabhängig, d.h. mit steigender Temperatur im Trockner nimmt entsprechend der sich vergrößernden treibenden Temperaturdifferenz der Verlustwärmestrom durch die Hüllfläche zu.
Für den Fall, daß die Solaranlage leckagenfrei arbeitet und alle Verluste nach außen sowie die kapazitiver Art vernachlässigt werden können, ergibt eine Rechnung für die verlustfreie Trocknung die untere Grenze für den Energiebedarf, wie er in Spalte 9 dargestellt ist. Spalte 10 zeigt deutlich, daß unter diesen Bedingungen auch die Temperatur T_{IT} vor dem Tabak und somit die Vorgabetemperatur T_{ET} (Gl. (3.3)) für die Solaranlage erheblich niedriger liegen.

Anhang 3 enthält die Beschreibung und Darstellung des Trocknungsprozesses und -potentials im Mollier-h,x-Diagramm für feuchte Luft.

Der Einfluß der vorgenommenen Korrekturen auf den Grad der Lasterfüllung und den solaren Deckungsanteil wird später diskutiert werden.

3.1.3 Das Kollektorfeld

Bei dem Kollektorfeld handelt es sich um ein modulares System aus 6 mal 8 parallelgeschalteten Einheiten mit je 2 hintereinandergeschalteten Luftkollektormodulen mit einer Abdeckungsfläche von je 7,68 m^2 (vgl. Abb. 3.3). Die Kollektoren sind mit einem Neigungswinkel von 15° zur Horizontalen und einer Ausrichtung nach Norden aufgestellt (südliche Halbkugel). Die Luftzu- und -abführung erfolgt durch ein Zweirohrsystem.

a) Kollektoraufbau

Die Rahmenkonstruktion besteht aus schwarz eloxierten Aluminiumprofilen; die rückseitige Isolierung aus Polyurethan-Hartschaum mit einer Aluminium-Dünnbandbeschichtung. Als Absorber dient ein speziell für Luftkollektoren entwickeltes, mit Absorbtionslack beschichtetes Aluminiumgestrick. Für die untere Abdeckung wurde Normalglas (3 mm) verwendet, für die obere eine 1,2 mm dicke glasfaserverstärkte Polyesterplatte.

b) Modelldarstellung

Die Modellierung großer Kollektorfelder ist mit TRNSYS nur bedingt möglich. Es existiert eine Komponente "Flachkollektor", die das Verhalten in Abhängigkeit von der verfügbaren Information wiedergibt. Eine genaue Beschreibung ist im TRNSYS Manual /27/ zu finden.

Für eine niedrig aggregierte Darstellung mit dem TRNSYS-Simulator muß das gesamte Feld aus einer Verknüpfung von Rohrleitungen, Strömungsteilern, T-Stücken und Einzelkollektoren be-

schrieben werden können. Diese Art der Wiedergabe ist jedoch nicht möglich, da der Simulator z.Z. max. 50 getrennte Module abbilden kann und das Feld allein 96 Einzelkollektoren umfaßt. Aus diesem Grunde wurde ein anderer Weg gewählt, das thermische Verhalten des Untersystems "Kollektorfeld" darzustellen.

Vom Forschungsinstitut für Wärmetechnik e.V., Stuttgart, sind Leistungsmessungen am Einzelkollektor vorgenommen worden. /53/ Es liegt eine Wirkungsgradkennlinie vor, bei der der Wirkungsgrad über der Differenz von Kollektoreintritts- und Umgebungstemperatur, dividiert durch die auf den Absorber fallende Strahlung nach ASHRAE-Standards /54/, aufgetragen ist. Abbildung 3.9 zeigt die Kennlinie sowie die für die Messungen maßgeblichen Parameter.
Da die TRNSYS-Komponente mit der Kennlinie gemäß dem ASHRAE-Standard arbeiten kann, wurde diese Art der Darstellung gewählt und die Charakteristik als Datenfile eingegeben. Im fol-

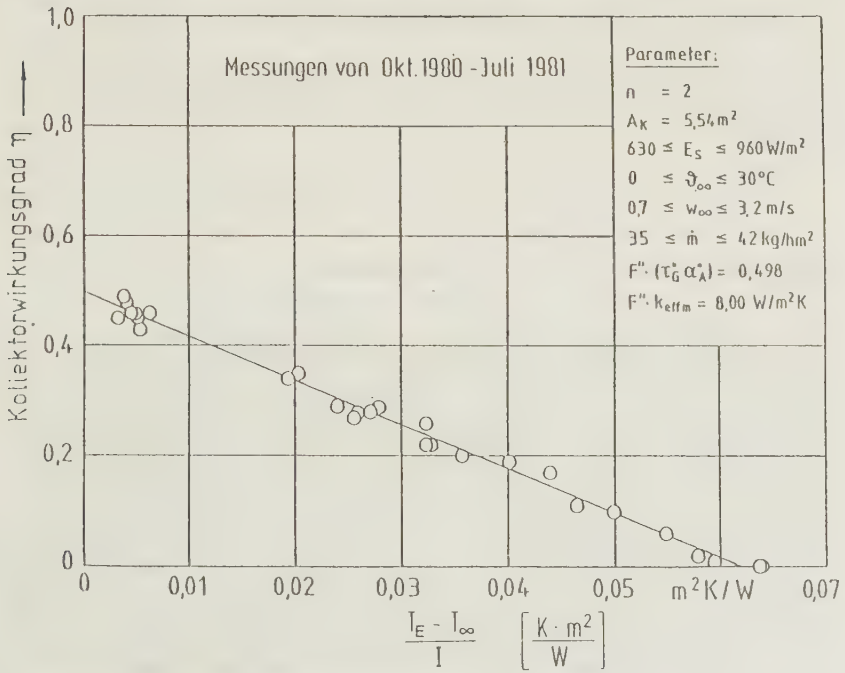


Abb. 3.9: Wirkungsgradkennlinie

genien wird die Übertragbarkeit der Leistungsmessung am Einzelkollektor auf das Feld diskutiert.

Die Geometrie des ausgemessenen Kollektors veranschaulicht Abbildung 3.10. Am Ende der Strömungsstrecke wird die Luft umgelenkt. Kollektorein- und -austritt befinden sich an demselben Ende.

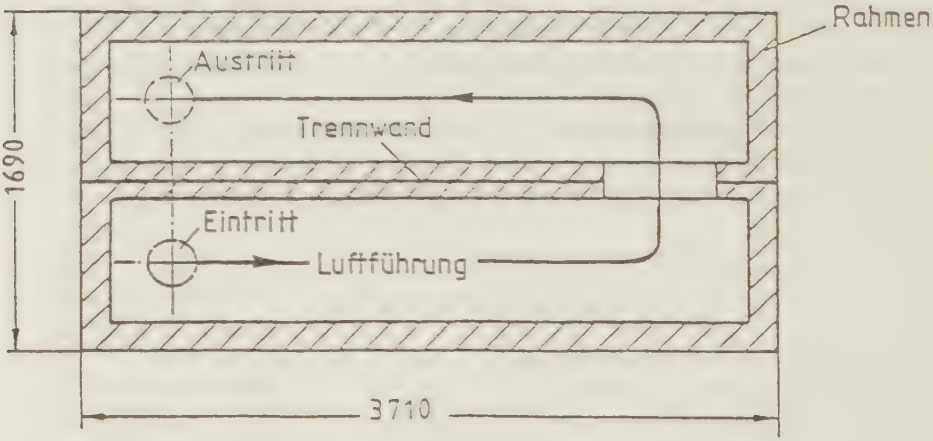


Abb. 3.10: Geometrie des Testkollektors

Das in Argentinien eingesetzte System besteht dagegen aus zwei parallel nebeneinanderliegenden und hintereinandergeschalteten Kollektoren ohne Strömungsumlenkung (vgl. Abb. 3.1). Zwei in Reihe geschaltete Module entsprechen also von der Durchströmlänge etwa einem Modul mit Umlenkung. In Abbildung 3.9 ist der Gültigkeitsbereich der Kennlinie für die Strahlung auf Absorberebene im Bereich von 630 bis 960 W/m^2 und für Luftdurchsätze von 35 bis 42 $kg/(h\ m^2)$ angegeben. Die Strahlung erreicht in Salta z.T. Werte von 1100 W/m^2 auf Kollektorebene, d.h. hier wird der Gültigkeitsbereich der Kennlinie überschritten. Die Sollmassendurchsätze liegen ohne Lekkagen und bei kleinem Massenstrom bei 13,6 $kg/(h\ m^2)$ bzw. bei

40,7 kg/(h m^2), wenn alle Gebläse arbeiten. Damit befindet sich der untere Wert für die Massendurchsätze ebenfalls außerhalb des Gültigkeitsbereichs. Laut Testbericht beträgt der relative Fehler des Wirkungsgrades bei einer Temperaturdifferenz von 30 K zwischen Kollektorein- und -austritt etwa 8 %. Die Unsicherheiten bei der Darstellung des Feldes durch die Kennlinie eines Einzelkollektors dürften sich aufgrund der oben angesprochenen Probleme in der gleichen Größenordnung bewegen, so daß der Gesamtfehler im Bereich von 15 bis 20 % liegt.

Erste Messungen, die im Oktober und November 1982 in Salta durchgeführt wurden, ergaben genügend brauchbare Daten für die Konstruktion der Kennlinie des Kollektorfeldes (Abb. 3.11). Bei Betrieb aller Gebläse sind insgesamt 29 Meßpunkte aufgenommen worden. Zwei Punkte oberhalb der Kurve 1 wurden als "Ausreißer" identifiziert und sind nicht in die Berechnung eingegangen. Der linke der beiden Punkte ist direkt nach Umschalten der Anlage auf Betrieb aller Gebläse gemessen worden. Die Kollektoraustrittstemperatur lag zu diesem Zeitpunkt noch sehr hoch, daher der "hohe" Wirkungsgrad. Der zweite Punkt wurde aufgenommen, als die Strahlung aufgrund einer Wolke sehr gering war; dies erklärt den hohen Abszissenwert. Da es sich jedoch nur um einen kurzzeitigen Strahlungsabfall handelte, blieb die Kollektoraustrittstemperatur unverändert, was den "hohen" Wirkungsgrad verständlich macht.

Für die übrigen 27 Punkte wurde nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate eine Ausgleichsgerade bestimmt (Kurve 2). Der relative Fehler $\overline{\Delta\eta}$ der Meßpunkte um den errechneten Mittelwert beträgt - 0,07 %, die Standardabweichung σ = 2,4 %. Die Messungen sind unter folgenden Bedingungen durchgeführt worden: Strahlung auf Kollektorebene 500 bis 1100 W/m^2, Umgebungstemperatur 28 bis 33° C, Eintrittsmassenstrom in das Kollektorfeld 20 000 kg/h, Austrittsmassenstrom 24 000 kg/h. Undichtigkeiten im Kollektorfeld waren die Ursache für das Ansaugen von ca. 20 % Umgebungsluft bei Betrieb aller Gebläse.

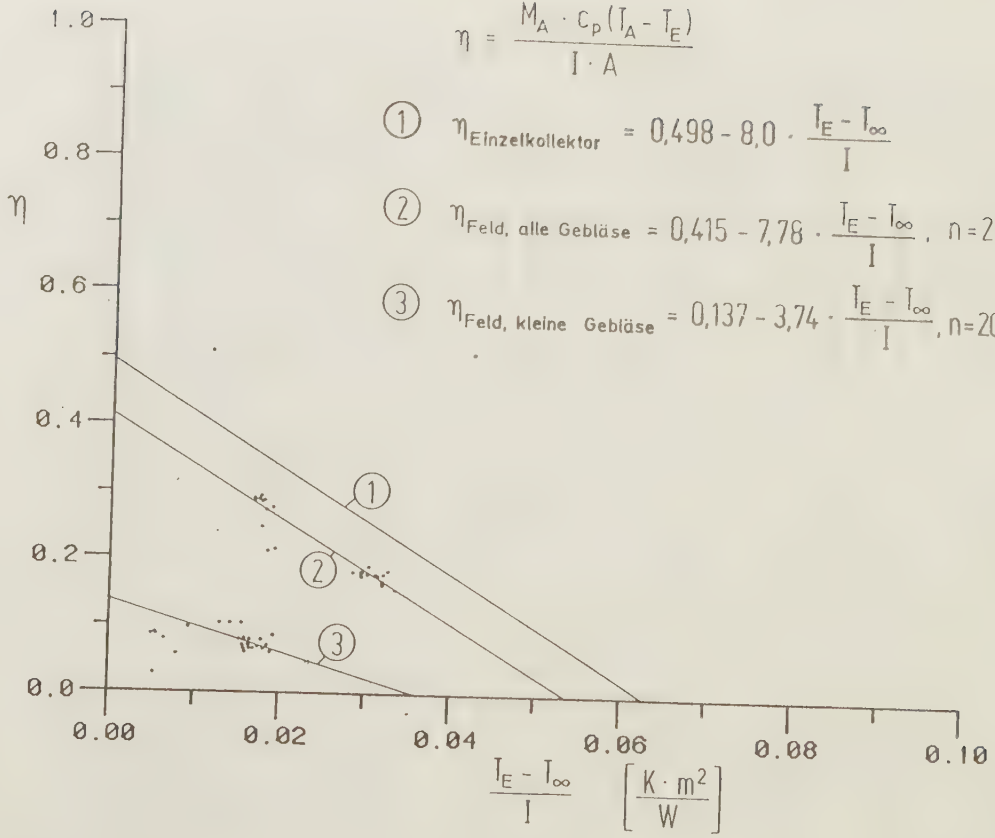


Abb. 3.11: Vergleich der Kollektorkennlinie

Wurde das Kollektorfeld hingegen nur mit den kleinen Gebläsen im Druckbetrieb durchströmt, so ergab sich bei einem Eintrittsmassenstrom von 8000 kg/h ein Austrittsmassenstrom von 3600 kg/h, d.h. 45 % des Eintrittsluftstroms wurden durch undichte Stellen in die Umgebung geblasen.
Insgesamt 20 Meßpunkte bilden die Kennlinie 3, die wegen der hohen Luftleckraten nur einen maximalen Wirkungsgrad von 13,7 % aufweist. Die Punkte links unterhalb der Kennlinie sind nicht mit in die Berechnung der Wirkungsgradgleichung einbezogen worden, da sie aus instationären Zuständen herrühren, d.h. der Luftaustausch geöffnet und geschlossen wurde. Für diese Gleichung beträgt der relative Fehler $\overline{\Delta\eta}$ der Meßpunkte um den errechneten Mittelwert 0,05 % und die Streuung σ nur 1,2 % bei gleichen Temperatur- und Strahlungsbedingungen wie für Kennlinie 2.
Diese Ausführungen zeigen, daß unter Zugrundelegung der Kennlinien 2 und 3 das thermische Verhalten des Kollektorfeldes in Salta hinreichend genau nachgebildet werden kann.

3.1.4 Der Speicher

a) Aufbau

Der Speicher (Abb. 3.12), der als Kurzzeit- und nicht Saisonspeicher konzipiert ist, hat die Aufgabe, während der Sonnenscheindauer (Annahme ca. 8 Std.) Wärme aufzunehmen, um den Trockner für die restlichen 16 Stunden des Tages mit Warmluft zu versorgen.
Der Speicherbehälter besteht aus einer Stahlblechkonstruktion von 10 m Durchmesser mit einer Innenisolierung von 0,07 m Styropor. Er besitzt eine untere und eine obere Hohlkammer für die Luftzu- und -abführung. Dazwischen befindet sich als Speichermasse eine 1,625 m hohe Flußkiesschüttung von ca. 240 t Kieselsteinen. Über das Speichermaterial liegen folgende Daten vor: Der für die Kiesel äquivalente Kugeldurchmesser D beträgt 0,04 m, die Porösität ε wurde zu 0,44 bestimmt die Oberflächendichte a des Kiesbettes beträgt 88,5 m^2/m^3. Während des

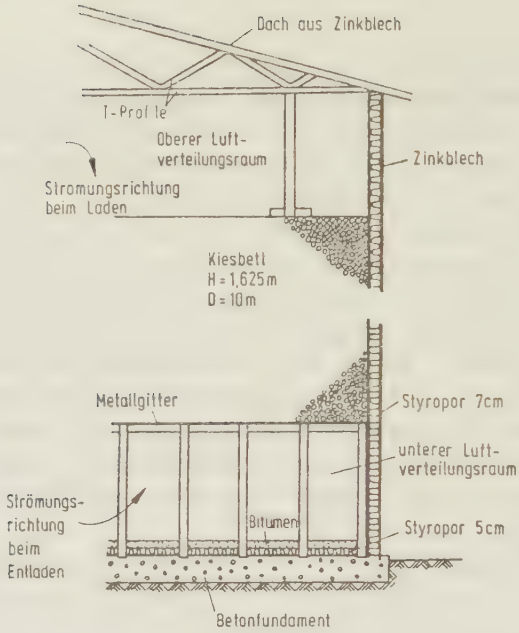


Abb. 3.12: Konstruktion des Kiesbettspeichers

Aufladevorgangs wird der Speicher mit einem Massenstrom Luft von ca. 26 000 kg/h von oben nach unten durchströmt. Beim Entladen mit ca. 13 000 kg/h ist die Strömungsrichtung umgekehrt.

b) Modelldarstellung

Das von TRNSYS benutzte und von HUGHES et al. /32/ entwickelte sogenannte "Unendliche-NTU-Modell" wird nachfolgend dargestellt und seine Anwendbarkeit auf den vorliegenden Fall untersucht. Es geht aus von dem Schumann-Modell /55/, das zwei Differentialgleichungen für die feste und fluide Phase beinhaltet:

$$\frac{\partial T_{Sp}}{\partial t} = \frac{NTU_c}{\tau} (T_L - T_{Sp}) \qquad (3.10)$$

$$\frac{\partial T_L}{\partial (x/L)} = NTU_c (T_{Sp} - T_L) - \frac{k \cdot U \cdot L}{\dot{M}_L \cdot c_{pL}} (T_L - T_\infty) \qquad (3.11)$$

mit
- U Umfang des Speichers
- k Wärmedurchgangszahl Speicher/Umgebung
- L Länge des Speichers
- $\dot{M}$ Massenstrom der Luft

$$\tau = \frac{V \cdot \rho_{Sp} \cdot c_{Sp}}{\dot{M}_L \cdot c_{pL}} \qquad (3.12)$$

$$NTU = \frac{h_v \cdot V}{\dot{M}_L \cdot c_{pL}} \qquad (3.13)$$

- NTU Number of Transfer Units
- h_v volumetrischer Wärmeübergangskoeffizient Luft/Speichermaterial
- V Speichervolumen

$$NTU_c = \frac{NTU}{1 + Bi/5} \qquad (3.14)$$

- Bi Biot-Zahl eines Speicherelements

Dem Modell liegen als Annahmen zugrunde:

- konstante Stoffwerte,
- keine Wärmeleitung in axialer Richtung,
- gleiche Strömungsgeschwindigkeit über dem Querschnitt.

Untersuchungen von HUGHES et al. /32/ haben gezeigt, daß für große Werte von NTU_c das Verhalten des Speichermodells unabhängig von NTU_c verläuft.

Für $NTU_c = \infty$ gilt

$$T_{Sp} = T_L = T.$$

Beide Gleichungen lassen sich zu einer zusammenfassen:

$$- A\rho_{Sp} \cdot c_{Sp} \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{M} \cdot c_{pL} \frac{\partial T}{\partial x} + k \cdot U(T - T_\infty) \qquad (3.15)$$

mit A als Speicherfrontfläche.

Zusätzlich kann die Annahme fehlender Wärmeleitung wegfallen. Daraus resultiert folgende Gleichung:

$$- A\rho_{Sp} \cdot c_{Sp} \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{M} \cdot c_{pL} \frac{\partial T}{\partial x} + k \cdot U(T - T_\infty) -$$

$$- \lambda_{Sp} A \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \qquad (3.16)$$

mit λ_{Sp} effektive Wärmeleitzahl der Schüttung in axialer Richtung.

Der Lösungsalgorithmus für die Differentialgleichung ist in TRNSYS Manual /27/ angegeben.

Anwendbarkeit des "Unendlichen-NTU-Modells"

Abbildung 3.13 zeigt den Einfluß von NTU_c auf die Genauigkeit der Lösung der Differentialgleichung (3.16) verglichen mit Messungen an solaren Warmluftsystemen. Das Diagramm stammt aus der Arbeit von HUGHES et al. /32/. Das schraffierte Band verdeutlicht, daß bei kleinen Werten von NTU_c auch andere Werte, wie Kollektorparameter, Speichergeometrie etc., auf das Verhalten des Speichermodells einwirken.

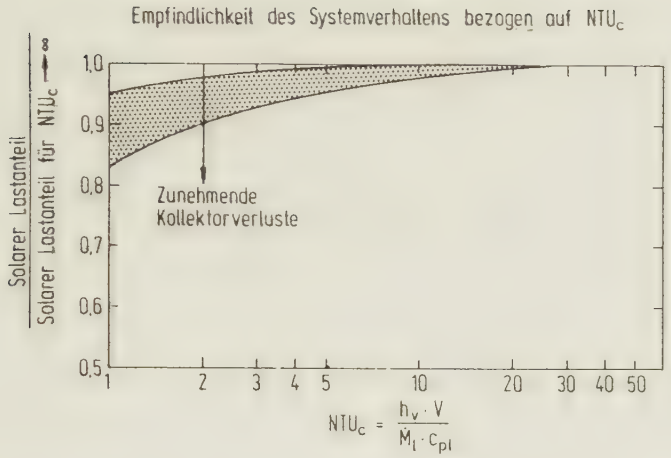


Abb. 3.13: Empfindlichkeit des Systemverhaltens in bezug auf NTU_c /32/

Um NTU berechnen zu können, muß zunächst die volumetrische Wärmeübergangszahl h_v bestimmt werden. Die Gleichung dafür entstammt einer Arbeit von J.P. COUTIER. /56/ Allgemein läßt sich diese Übergangszahl darstellen als

$$h_v = c_1 \cdot \left(\frac{\dot{M}}{D}\right)^{c_2} \qquad (3.17)$$

mit $\dot{M}$ Massenstrom Luft durch den Speicher und
D Durchmesser der Speicherpartikel.

COUTIER vergleicht verschiedene Untersuchungen und korrigiert als Ergebnis die Konstanten von LÖF et al. (1940) /57/ von

$c_1 = 650$ auf $c_1 = 700$ und

$c_2 = 0{,}7$ auf $c_2 = 0{,}76$ (vgl. Abb. 3.14).

Aus Abbildung 3.15 (S. 63) ist ersichtlich, daß im Bereich von 500 bis 30 000 kg/h NTU etwa zwischen 20 und 70 liegt. Die Kurve 1 ist mit dem Wert von h_v nach COUTIER /56/, die Kurve 2 mit dem von LÖF /57/ erstellt worden.

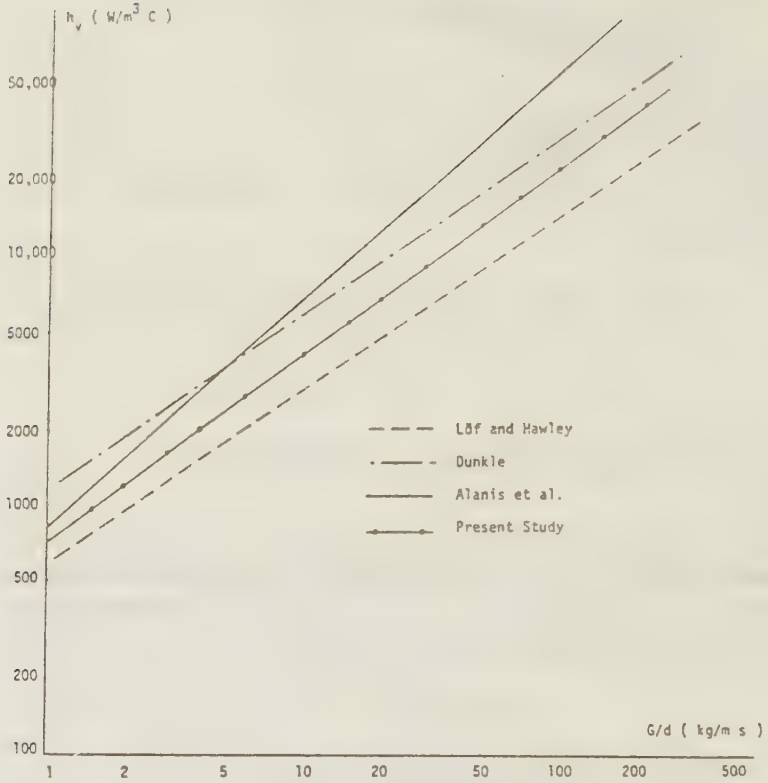


Abb. 3.14: Vergleich der volumetrischen Wärmeübergangskoeffizienten verschiedener Autoren /56/

Das ursprüngliche Schumann-Modell basiert auf der Annahme, daß Temperaturgradienten in den einzelnen Speicherpartikeln vernachlässigt werden können. Diese Annahme kann durch die Definition eines korrigierten Wertes von NTU aufgehoben werden. JEFFERSON /58/ führt in seiner Arbeit aus, daß Temperaturgradienten durch einen korrigierten NTU-Wert berücksichtigt werden können:

$$NTU_c = \frac{NTU}{(1 + Bi/5)} \qquad (3.18)$$

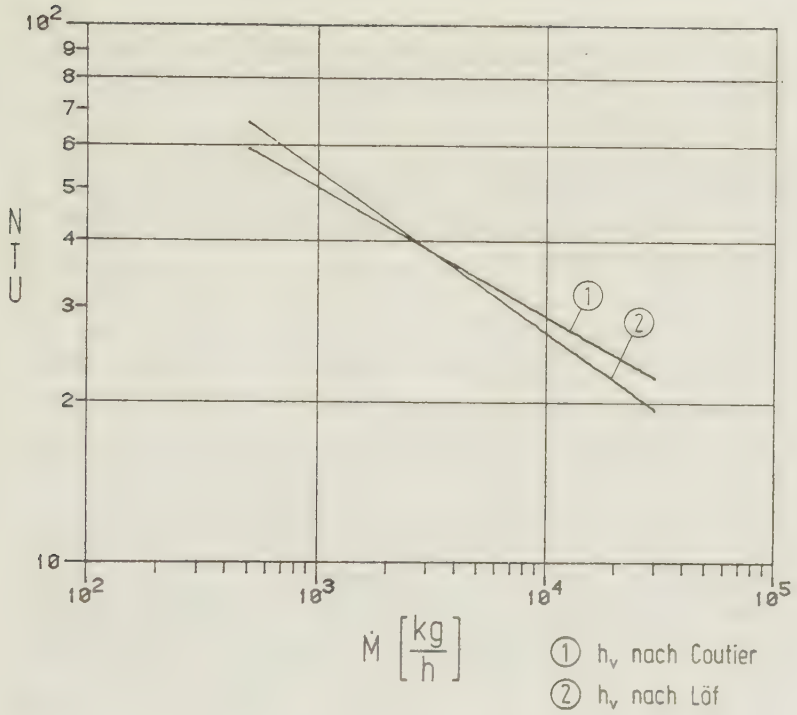


Abb. 3.15: NTU in Abhängigkeit vom Massenstrom

Nach JEFFERSON wird die Biot-Zahl in diesem Fall mit dem äquivalenten Kieselradius gebildet. Eine Nachrechnung für den Massenstrom von 20 000 kg/h ergibt eine Biot-Zahl von 0,29. Dieses Ergebnis belegt, daß die Biot-Zahl, da sie bedeutend kleiner ist als 1, praktisch keinen Einfluß auf NTU hat. Somit ist der Nachweis erbracht, daß das "Unendliche-NTU-Modell" auf den zu untersuchenden Speicher ohne Einschränkung angewendet werden kann (vgl. Abb. 3.13).

Ein von KUHN et al. /33/ durchgeführter Vergleich verschiedener Ansätze bestätigt, daß dieses Modell wegen seiner einfachen Programmierbarkeit und dennoch großen Genauigkeit für Langzeitsimulationen das am besten geeignete ist. Die Unter-

suchung, in der u.a. auch ausführlich die Modellvalidation behandelt wird, zeigt jedoch, daß trotz der theoretisch nachweisbaren Exaktheit die Reproduzierbarkeit von Meßreihen erhebliche Schwierigkeiten bereitet. Das Hauptproblem ist offensichtlich das Auftreten von Leckagen im Speicher, die vom Modell nicht erfaßt werden konnten. Darauf wird später noch genauer einzugehen sein.

3.1.5 Gebläse und Leitungssystem

Die Luftumwälzung im System erfolgt durch drei Gebläse (Abb. 3.1), die mit konstanten, nicht regelbaren Luftdurchsätzen arbeiten. Die beiden kleinen Gebläse sind für eine Nennförderleistung von je 13 000 kg/h Luft ausgelegt. Sie laufen während des gesamten Trocknungsprozesses ohne Unterbrechung und versorgen den Trockner mit vorgewärmter Luft entweder aus dem Kollektorfeld oder dem Speicher. Ihr Energiebedarf beträgt je 2,5 kW. Ist genügend Sonnenschein vorhanden, schaltet die Regelung das große Gebläse zu, das die Aufladung des Speichers übernimmt. Es ist für eine Förderleistung von 39 000 kg/h Luft ausgelegt und verbraucht 12 kW (Anhang 4 zeigt die Gebläsecharakteristiken). Von der Fördermenge des großen Gebläses gehen 2/3 in den Speicher und 1/3 wird dem Trockner zugeführt. Gebläse und Gebläseregelung sind Standard-TRNSYS-Komponenten und werden ohne Modifikationen benutzt.

Für die Bestimmung der Wärmeverluste ist es notwendig, die hierfür infrage kommenden Rohrleitungen einzubeziehen. Den Hauptanteil des Leitungssystems bilden die Verteilungs- und Sammelleitungen des Kollektorfeldes (vgl. Abb. 3.1). Sie sind aus den in Kapitel 3.1.3 b) beschriebenen Gründen nicht modelliert worden. Nicht berücksichtigt wurden die Abluftleitung vom Trockner, die nur wenige Meter beträgt, und die Kaltluftzuführungen zum Kollektorfeld, da die dort zirkulierende Luft nur unerheblich über dem Umgebungsniveau liegt und somit Wärmeverluste gering sind. Nachgebildet wurde die Warmluftlei-

tung vom Kollektoraustritt zum Trockner (vgl. Abb. 3.1), die etwa 25 m lang ist und die größten Wärmeverluste erwarten läßt.

In der Realität handelt es sich um zwei verschiedene Rohre: Das erste ist ein Rechteckrohr mit 0,9 m Seitenlänge, das vom Ende des Kollektorfeldes bis zum Gebläse reicht. Die Luftmassenströme liegen im Bereich von 0 bis 39 000 kg/h mit Temperaturen zwischen ca. 30 und 100° C. Das sich anschließende Rohr mit einem Durchmesser von 0,56 m verläuft vom Bypass zum Trockner. Hier soll der Massenstrom konstant 13 000 kg/h betragen bei Temperaturen zwischen 30 und 75° C.

Für die Modellbildung wurde von e i n e m 25 m langen Rohr mit einem Durchmesser von 0,65 m und einer 16 mm dicken Armaflex-Isolierung ausgegangen. Unter Zugrundelegung eines mittleren Massenstroms von 16 000 kg/h erhält man an der Rohrinnenseite für die Wärmeübergangszahl nach VDI-Wärmeatlas (Gb) den Wert von 26,5 W/(m^2 K). Die Wärmeübergangszahl an der Rohraußenseite wurde nach DIN 4108 mit 23 W/(m^2 K) eingesetzt. Es ergibt sich damit eine Wärmeübergangszahl

$$k = 2{,}07 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}.$$

Mit diesen Daten wird in der Komponente "Rohrleitung" die Austrittstemperatur aus der Energiebilanz am Rohr errechnet:

$$T_A = T_\infty + (T_E - T_\infty) \cdot e^{-(k \cdot A/\dot{M} \cdot c_p)} \qquad (3.19)$$

Mit plausiblen Annahmen für die Temperaturen, $T_E = T_{AK} = 70°$ C, $T_\infty = 28°$ C, und den vorher aufgeführten Daten ergibt sich nach Gleichung (3.19) eine Austrittstemperatur von 69,0° C, d.h. der Temperaturunterschied zwischen Rohrein- und -austritt sollte etwa 1° C betragen. Abweichungen von Meßergebnissen bedeuten, daß der wirkliche k-Wert nicht dem angenommenen entspricht und korrigiert werden muß.

3.1.6 Anlagenregelung

a) Darstellung des Regelschemas

Die Regelung (Anhang 5) besteht aus getrennten Systemen für die Feuchtigkeits- und Temperaturkontrolle. Wie bereits in Kapitel 3.1.1 ausgeführt, bestimmt der Trocknungsprozeß die Trockner-Zulufttemperatur und -Zuluftfeuchte. Es soll mit einem konstanten Massenstrom von 13 000 kg/h getrocknet werden. Über eine Feuchteregelung wird eine Fortluft-Außenluft-Mischklappeneinheit in der Weise gesteuert, daß die vom Trocknungsprozeß vorgegebene Zuluftfeuchte gehalten wird. Je nach Trocknungsphase werden zwischen 0 und 100 % der feuchten Trocknerabluft gegen trocknere Umgebungsluft ausgetauscht.

Die Temperaturregelung besteht aus vier Differenzregelkreisen: für die Ein-/Ausschaltung des Kollektorfeldes, die Speicherladung, die Speicherentladung und die Schaltung des konventionellen Ölbrenners.

- Solange nicht genügend Sonne für die Speicherauf-ladung vorhanden ist, geschieht die Trocknerversorgung direkt vom Kollektorfeld über die beiden kleinen Gebläse mit der Sollmenge für den Trockner von 13 000 kg/h Luft.

- Ist die Strahlung hoch genug, so daß gespeichert werden kann, wird der große Ladeventilator zugeschaltet, der bei einem Luftdurchsatz von 39 000 kg/h zugleich die Speicherladung und die Trocknerversorgung übernimmt.

- Für den Nachtbetrieb - oder wenn tagsüber kurzzeitig die Sonne nicht scheint - geschieht die Trocknerversorgung aus dem Speicher über die zwei kleinen Trocknerventilatoren bei 13 000 kg/h.

- Falls die geforderten Temperaturen vom Solarsystem nicht erbracht werden können, erfolgt eine automatische Umschaltung auf den Ölbrenner.

In den drei erstgenannten Fällen werden die Kollektoraustrittstemperatur, die mittlere Speicher- sowie Trockneraustrittstemperatur miteinander verglichen, um die entsprechende Regelstrategie bestimmen zu können. Da die Luftdurchsätze selbst nicht regelbar sind, wird für den Fall, daß vom Solarsystem zu hohe Temperaturen vorgegeben werden, dies durch ein Bypass-System abgefangen. Vor Kollektoreintritt wird eine je nach Temperatur unterschiedliche Luftmenge abgezweigt und vor dem Trockner wieder zugeführt, so daß dort pro Stunde 13 000 kg Luft mit der gewünschten Temperatur zur Verfügung stehen. Als Referenztemperatur für die Trocknereintrittstemperatur dient eine Meßstelle in der Rohrleitung kurz vor dem Trockner, um gegebenenfalls Temperaturverluste in der Heißluftleitung vom Solarsystem kompensieren zu können.

b) Modellierung

Die Regelung konnte mit Standard-TRNSYS-Komponenten, wie temperaturkontrolliertem Strömungsteiler für den Bypass, T-Stükken, Strömungsteilern sowie Controllern für die Temperaturdifferenzen, nachgebildet werden, vgl. TRNSYS Manuel V. 11.1. /27/ Für die Regelungsstrategie wurde jedoch eine eigene TRNSYS-kompatible Komponente entwickelt, die Controller-Ergebnisse aufnimmt, diese verarbeitet und daraus ein optimales Regelungsverhalten bestimmt. Sie leitet die Entscheidungen an die entsprechenden Steuerungsorgane, wie Klappen und Gebläse, weiter (s. Abb. 3.18, S. 74).

3.1.7 Luftleckagen

a) Beschreibung und Konsequenzen

Alle in den vorigen Abschnitten durchgeführten Untersuchungen und Modellentwicklungen beruhen auf der Annahme, es gebe keine Luftleckagen im gesamten System bzw. - wenn es sie gäbe - wären sie vernachlässigbar klein. Messungen am System zeigen jedoch Leckverluste im Bereich von 60 % des Massenstroms am

Austritt des Kollektorfeldes bei Betrieb der kleinen Gebläse (Druckbetrieb) und eine Zunahme des Massenstroms am Austritt des Feldes um 20 % des Eingangsmassenstroms bei Betrieb aller Gebläse. Das Ansaugen großer Mengen Umgebungsluft durch Kollektorleckagen führt dazu, daß die Luftfeuchte, die der Trockner benötigt, nicht mehr gehalten werden kann. Folgendes Beispiel verdeutlicht dies:

Alle Gebläse sind in Betrieb, Luftaustausch und Bypass sind geschlossen. Es ist von einem Abluftmassenstrom aus dem Trockner von 11 000 kg/h auszugehen mit einer Temperatur von 35° C und einem Wassergehalt von x = 0,0414. Dies entspricht einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95 %. Diese Luft wird mit der aus dem Speicher austretenden gemischt.

Um einen oberen Grenzwert für den Wassergehalt am Kollektorfeldaustritt zu bestimmen, sollen für den Speicheraustritt folgende konservative Annahmen gelten: Der Massenstrom beträgt 16 000 kg/h bei gleichen Werten für Temperatur und Wassergehalt wie am Trockneraustritt, so daß sich die Eingangsdaten für das Kollektorfeld ergeben:

$$\dot{M}_{EK} = 27\,000 \text{ kg/h}$$
$$T_{EK} = 35^{\circ} \text{ C}$$
$$x_{EK} = 0{,}0414$$
$$\varphi_{EK} = 95 \text{ \%}$$

Im Kollektorfeld wird diesem Luftstrom ein Massenstrom von 5400 kg/h ($\dot{M}_{AK} = 1{,}2 \cdot \dot{M}_{EK}$), vgl. Kapitel 3.1.3 b), mit Umgebungsbedingungen $T_{\infty} = 25^{\circ}$ C, x = 0,0164, φ = 70 % zugeführt. Der Austrittsmassenstrom aus dem Kollektorfeld beträgt somit 32 400 kg/h bei einem Wassergehalt von $x_{AK} = 0{,}0372$. Für den Fall, daß die Sonne nicht scheint, ergibt sich eine Mischungstemperatur von 33,3° C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von φ = 95 %. Bei Sonnenschein erhöht sich je nach Bestrahlungsstärke die Kollektoraustrittstemperatur (Spalte 1), und es sinkt die relative Luftfeuchtigkeit (Spalte 2), wie dies

die folgende Auflistung verdeutlicht. Die dritte Spalte gibt den unteren Grenzwert der relativen Luftfeuchtigkeit bei Umgebungsbedingungen wieder.

T_{AK} [°C]	ϑ [%]	φ_∞ [%]
35	86,0	39,0
40	65,5	29,5
50	39,0	18,0
60	24,0	11,0
70	15,5	7,0

Die Werte des Trockneraustritts - hohe relative Luftfeuchte (95 %) und niedrige Temperatur (35° C) - werden am Ende der Vergilbungsphase erreicht. Die Trocknereintrittstemperatur soll zu diesem Zeitpunkt ca. 40° C betragen bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 %. Die oben aufgeführten Daten belegen jedoch, daß unter Berücksichtigung der vorhandenen Leckagen mit einer höheren relativen Luftfeuchtigkeit als 65,5 % nicht gerechnet werden kann. Das zeigt, daß in der Niedrigtemperaturphase der Trocknung die Luftfeuchtigkeit nicht auf den erforderlichen Wert einzuregeln ist. Selbst ohne Leckagen würde bei gleichbleibendem Wassergehalt eine Anhebung der Temperatur von 35 auf 40° C ein Absinken der relativen Luftfeuchtigkeit von 95 auf 73 % bewirken.

Eine überschlägige Rechnung soll die Größenordnung der Leckflächen im Einzelkollektor demonstrieren: Zunächst wird der Betrieb mit den kleinen Gebläsen betrachtet. Aus dem Massenstrom am Eingang und Ausgang des Feldes wird ein Mittelwert gebildet. Unter der Annahme, daß die Strömungsverteilung in allen 96 Kollektoren gleich ist, kann eine mittlere Geschwindigkeit im Einzelkollektor von 0,63 m/s berechnet werden. Ebenso läßt sich der Leckmassenstrom der Luft, die ausgeblasen wird, gleichverteilen. Weiterhin wird angenommen, daß die Geschwindigkeit, mit der der Leckmassenstrom ausströmt, die gleiche ist, wie sie im Kollektor herrscht, so daß sich eine Leckagefläche von ca. 310 cm^2 pro Einzelkollektor ergibt.

Beim Betrieb mit allen Gebläsen beträgt die mittlere Geschwindigkeit 1,75 m/s und die Leckagefläche 65 cm^2 pro Einzelkollektor. Übertragen auf das Feld bedeutet dies eine Gesamtleckagefläche von 0,625 m^2. Die Fläche des regelbaren Luftaustausches zwischen den beiden kleinen Gebläsen wird hingegen nicht größer als 0,126 m^2, was ca. 20 % des nicht regelbaren Austausches im Kollektorfeld entspricht. Dieser Unterschied in der Leckagefläche erklärt sich durch die Art der Reparatur, die am Feld durchgeführt wurde. Alle sichtbaren Fugen an den Kollektoren sind mit einem 10 cm breiten Dichtungsband abgeklebt worden, das sich aufgrund der hohen Kollektortemperaturen zum Teil gelöst hat und - je nachdem, ob im Druck- oder Saugbetrieb gefahren wird - Spalten von unterschiedlicher Größe hervorruft.

Im Falle, daß der dem Trockner zugeführte Massenstrom unter dem Sollwert liegt, arbeitet der Trockner im Unterdruckbereich - die kleinen Gebläse saugen Luft von dort an -, und es gelangt Luft unter Umgebungsbedingungen in die Trockenkammer; ein Umstand, der eine genaue Feuchteregelung unmöglich macht.

Der Leistungsabfall im Kollektorfeld (vgl. Kap. 3.1.3 b)) muß sich auch negativ auf das Ladungsverhalten des Speichers auswirken. Darüber hinaus ergaben Durchflußmessungen, daß ca. 20 % des Eingangsmassenstroms während des Durchströmens des Speichers verlorengehen. Folgende Werte wurden gemessen:

$$\dot{M}_{SpE} = 13\,809 \text{ kg/h}$$
$$\dot{M}_{SpA} = 10\,976 \text{ kg/h, d.h.}$$
$$\dot{M}_{SpA} = 0{,}79\ \dot{M}_{SpE} \qquad (3.20)$$

Für den Entladevorgang existieren keine entsprechenden Messungen. Da jedoch die Massenströme kleiner sind, wird auch der absolute Verlust geringer sein.

Aufgrund der vorangegangenen Feststellungen muß angenommen werden, daß andere Komponenten, wie Trockner, Leitungen und

Klappensysteme, ebenfalls nicht völlig luftdicht sind, so daß Verluste gegebenenfalls berücksichtigt werden müssen.

b) Modelldarstellung

TRNSYS hat weder in den einzelnen Komponenten noch als spezifische Komponente die Behandlung von Leckagen vorgesehen. Um diese darzustellen, bieten sich verschiedene Alternativen an:

- Entwicklung einer Komponente "Leckage";
- Änderung von Standardkomponenten, um den Einfluß von Lecks zu erfassen;
- Benutzung von Komponenten, wie T-Stück oder Strömungsteiler, um das Ansaugen oder Ausblasen von Luft an beliebigen Stellen der Anlage nachzubilden.

Daß alle drei Möglichkeiten gleichwertig sind, wird von DAUGHERTY et al. /59/ sowie SHINGLETON et al. /60/ nachgewiesen.

In dieser Arbeit wurde durch Änderung der Komponenten Kollektor und Trockner erreicht, daß der Einfluß von Luftverlusten bzw. des Ansaugens von Frischluft berechnet werden kann. Die Größe des Massenstroms wird durch entsprechende Parameter für die Komponenten von außen vorgegeben. Es wird angenommen, daß das Entweichen oder Zumischen der Luft jeweils am Eintritt in die Komponente erfolgt. Bei Druckbetrieb wird deshalb ein Teil der Luft vor der Weiterbehandlung abgezweigt und bei Saugbetrieb Luft unter Umgebungsbedingungen zugemischt. Dadurch ändern sich die Eingangstemperatur und Feuchte des nun größeren Massenstroms nach den folgenden Beziehungen:

$$T_{real} = (T_E \cdot \dot{M}_E + T_\infty \cdot \dot{M}_{Leck})/\dot{M}_{ges} \qquad (3.21)$$

$$x_{real} = (x_E \cdot \dot{M}_E + x_\infty \cdot \dot{M}_{Leck})/\dot{M}_{ges} \qquad (3.22)$$

$$\dot{M}_{ges} = \dot{M}_E + \dot{M}_{Leck}$$

Die Luftverluste an Abschlußklappen wurden durch die Standardkomponente "Strömungsteiler" dargestellt (vgl. die gestrichelten Pfeile in Abb. 3.16).

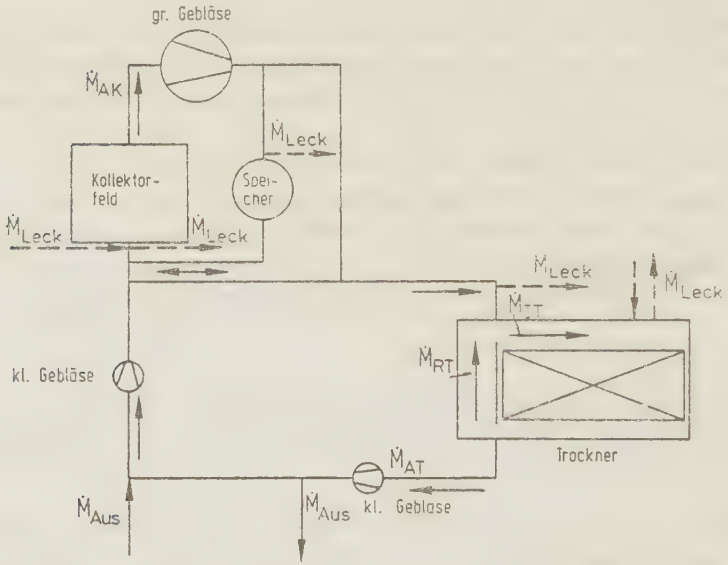


Abb. 3.16: Luftströme und Leckagen

3.2 Zusammenfassung der Einzelkomponenten

Die Komponenten wurden zu zwei unterschiedlichen Systemmodellen zusammengefaßt. Mit Modell 1, das keine Trocknerkomponente und nur eine vereinfachte Temperaturregelung enthält, können der Auflade- und Entladezyklus des Speichers sowie das Verhalten des Kollektorfeldes untersucht werden (Abb. 3.17). Modell 2 (Abb. 3.18, S. 74; Zeichenerklärung und Erläuterungen S. 75 ff) repräsentiert die Gesamtanlage, wie sie in Abb. 3.3 dargestellt ist. Mit ihm können die Regelung, Änderungen

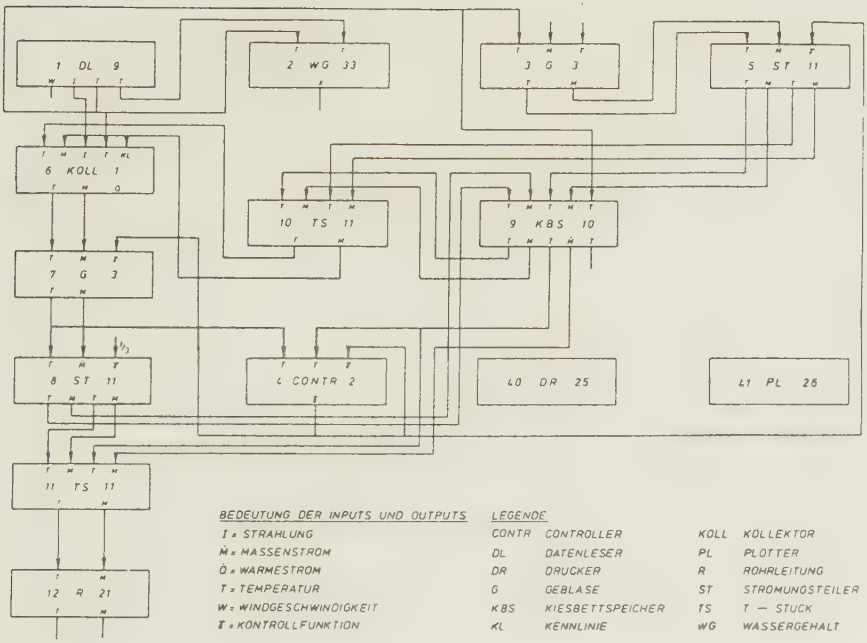


Abb. 3.17: TRNSYS-Flußdiagramm des vereinfachten Anlagenschemas

am Kollektorfeld und Speicher sowie der Einfluß von Leckagen auf den solaren Deckungsanteil bei unterschiedlichen Lastvorgaben analysiert werden. Anhang 6 und 7 geben die Beschreibung dieser Modelle in der TRNSYS-Sprache wieder zusammen mit einer Komponenten-Verknüpfungsliste, wie sie bei der Verifikation automatisch generiert wird.

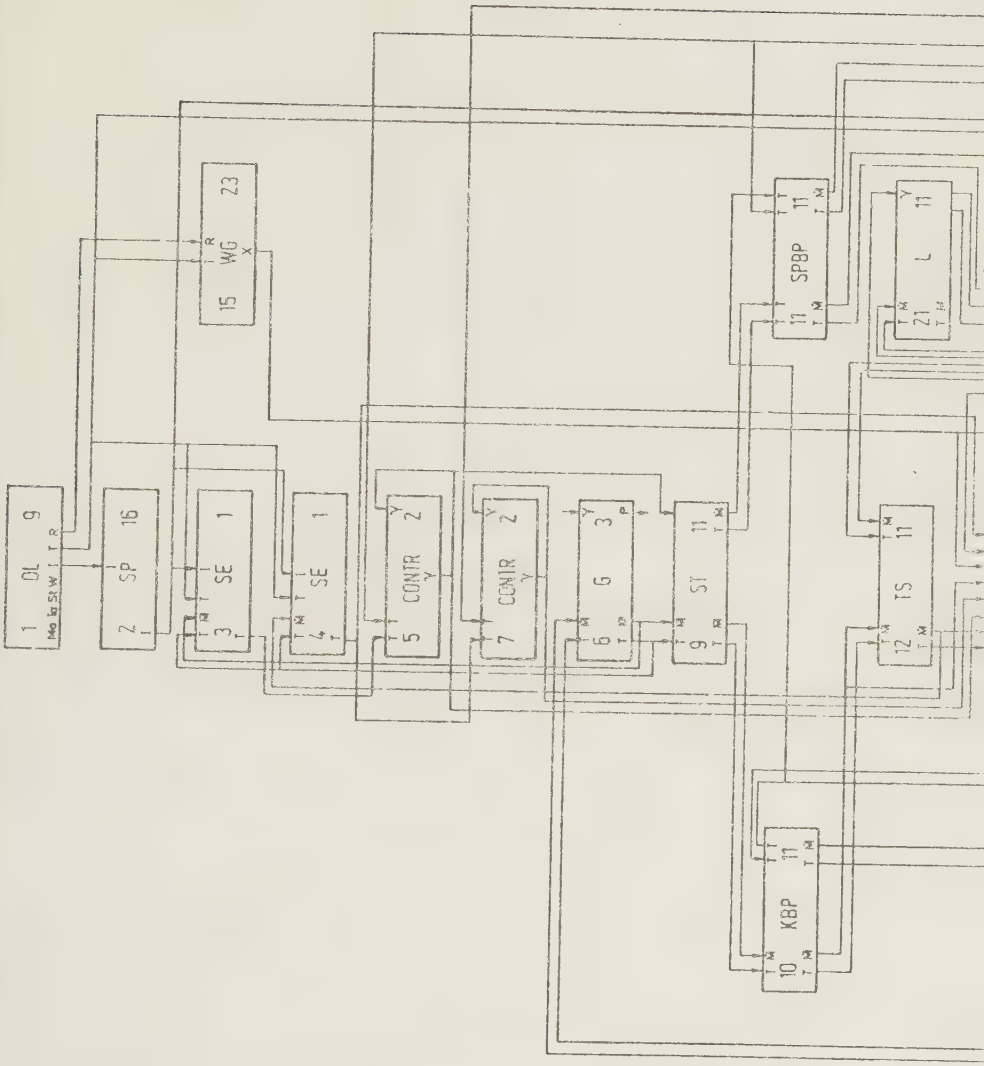
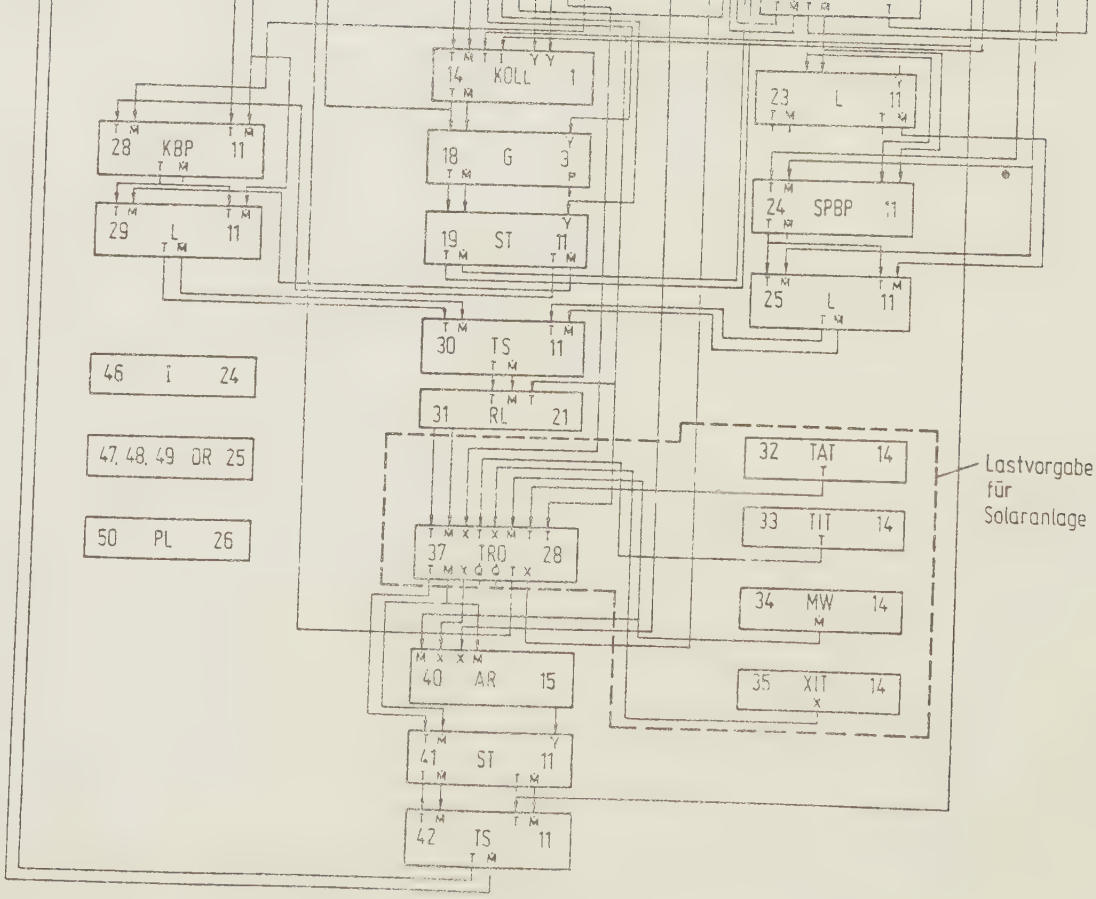


Abb. 3.18: TRNSYS-Flußdiagramm der Gesamtanlage


14 KOLL 1
23 L 11
28 KBP 11
18 G 3
Z4 SPBP 11
29 L 11
19 ST 11
25 L 11
30 TS 11
46 I 24
31 RL 21
32 TAT 14
47. 48. 49 OR 25
33 TIT 14
37 TRO 28
34 MW 14
50 PL 26
40 AR 15
35 XIT 14
41 ST 11
42 TS 11
Lastvorgabe für Solaranlage

Zeichenerklärung zu Abbildung 3.18

LEGENDE

AR	Austauschrate
CONTR	Controller
DL	Datenleser
DR	Drucker
G	Gebläse
I	Integrator
KBP	Kollektorbypass
KBS	Kiesbettspeicher
KOLL	Kollektor
L	Leckagenbehandlung
MW	Wasserentzug im Trockner
R	Rohrleitung
PL	Plotter
SP	Strahlungsdaten Prozessor
SPBP	Speicherbypass
ST	Strömungsteiler
TAT	Lufttemperatur am Trockneraustritt
TIT	Lufttemperatur vor Tabak
TS	T-Stück
WG	Wassergehalt der Umgebungsluft
XIT	Wassergehalt vor Tabak

BEDEUTUNG DER INPUTS UND OUTPUTS

I	Strahlung
$\dot{M}$	Massenstrom
Mo	Monat
$\dot{Q}$	Wärmestrom
R	Relative Luftfeuchtigkeit
T	Temperatur
TA	Tag
ST	Stunde
W	Windgeschwindigkeit
X	Wassergehalt
γ	Kontrollfunktion

Erläuterung der in Abbildung 3.18 benutzten Units und Komponenten

Unit	Type	Bezeichnung
1	9	Datenleser
2	16	Strahlungsprozessor
3	1	Sensor S 3.1
4	1	Sensor S 4.1
5	2	Temperaturcontroller Gamma-0 (S 3.1 : T1SP)
6	3	Kleines Gebläse
7	2	Temperaturcontroller Gamma-1 (S 4.1 : TMSP)
8		
9	11	Strömungsteiler Speicher entladen / Kollektorfeld
10	11	Strömungsteiler für Kollektorbypass
11	11	Strömungsteiler für Speicherbypass
12	11	T-Stück vor Kollektorfeld (Speicherkreislauf)
13	7	Controller für Gamma-G, Gamma-D, Gamma-L, Leckagen
14	1	Kollektorfeld Grammer
15	23	Wassergehalt der Umgebungsluft
16		
17		
18	3	Großes Gebläse
19	11	Strömungsteiler Speicher / Trockner
20		
21	11	Leckage bei der Speicherladung
22	10	Kiesbettspeicher, 240 t
23	11	Speicherlecks beim Entladen
24	11	Speicherbypass
25	11	Leckagebehandlung des Speichers vor Trockner
26		
27		
28	11	Kollektorbypass
29	15	Leckverlust bei Betrieb mit kleinen Gebläsen
30	11	T-Stück vor Rohrleitung

Unit	Type	Bezeichnung
31	21	Rohrleitung von Kollektoraustritt bis Trocknereintritt
32	14	TAT
33	14	TIT
34	14	Wasserentzug
35	14	XIT
36		
37	28	Trockner
38		
39	15	Anteil der Solarenergie an der Gesamtlast (Rohrverluste)
40	15	Berechnung der Austauschrate
41	11	Strömungsteiler für Luftaustausch
42	11	T-Stück für Luftaustausch
43	15	Konventioneller Energieverbrauch
44	15	Gesamtenergieverbrauch
45	15	Solarer Deckungsanteil
46	24	Integrator
47	25	Drucker-1
48	25	Drucker-2
49	25	Drucker für Integrator
50	26	Plotter

3.3 Modellqualifikation

Die vorangehenden Ausführungen haben gezeigt, daß es möglich ist, die Komponenten der Solaranlage - Kollektorfeld, Speicher, Rohrleitungen, Gebläse, Anlagenregelung, Leckagen - und ihre Verbindungen untereinander mit Standard-TRNSYS-Programmen bzw. TRNSYS-kompatiblen Programmen nachzubilden (vgl. Kap. 3.1.3 bis 3.1.7), und daß unter den vorgegebenen Bedingungen zuverlässige Ergebnisse erzielt werden können. Dies soll durch einen Vergleich mit den in Salta aufgenommenen Messungen nachgewiesen werden.

Die Nachbildung des Bulk-Trockners ist nur in unzureichendem Maße möglich, da zur Zeit weder genügend Informationen über den komplexen Wärme- und Stoffübergang im Tabakbündel während eines Trocknungszyklus existieren, noch ausreichende Kenntnisse über die Strömungsführung im Trocknerhaus vorhanden sind. Obwohl dieser Umstand zwangsläufig zu einem recht primitiven Modell führen muß, kann das Trocknermodell als Lastvorgabe an das Solarsystem benutzt werden. Es ist in der Lage zu bestimmen, welche Temperaturen und Wassergehalte bei dem vorgegebenen Massenstrom von 13 000 kg/h Luft für den solaren Anlagenteil bereitstehen müssen, um die vor Eintritt in den Tabak gemessenen und als Vorgabe dienenden Temperaturen T_{IT} und Wassergehalte x_{IT} erreichen zu können. Sollte die erforderliche Wärmemenge für den Wasserentzug, der ebenfalls durch Messungen vorgegeben ist, nicht erzielt werden, so wird zugeheizt. Diese Zusatzwärmemenge ist bestimmbar. Das bedeutet, daß der Energiebedarf für die Trocknung und damit der solare Deckungsanteil berechnet werden können. Einflüsse auf den Trocknungsvorgang durch andere Wassergehalte am Trocknereintritt als gefordert können nicht erfaßt werden.

4. Validation

4.1 Vorgehen

Unter Modellvalidation wird, wie in Kapitel 2.4 erläutert, die Feststellung verstanden, daß ein Rechenmodell einen zufriedenstellenden Grad der Richtigkeit innerhalb des beabsichtigten Anwendungsbereichs besitzt. Da über das Anlagenverhalten in Salta Meßwerte vorliegen - sie wurden im Oktober/November 1982 aufgenommen - bietet sich als Gültigkeitstest ein Output-Vergleich an.

Benutzt wird das in Abbildung 3.17 dargestellte Modell, das im ersten Schritt so "aufgeschnitten" wird, daß in die Komponenten Kollektorfeld, Kiesbettspeicher und Rohrleitung Meßwerte als Inputs gegeben werden können (Abb. 4.1). Die errech-

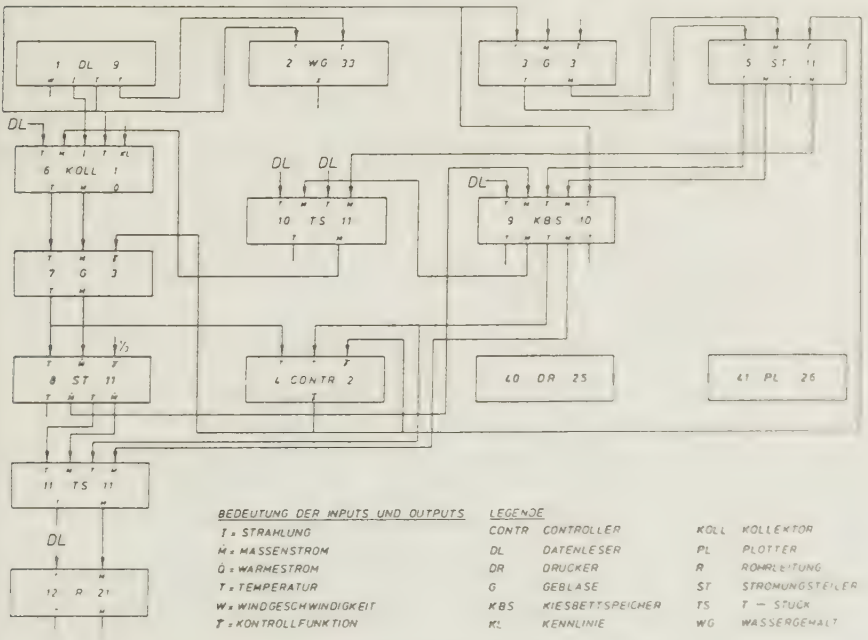


Abb. 4.1: Flußdiagramm des Modells für die Komponentenvalidation

neten Modell-Outputs werden anschließend mit den gemessenen Outputs verglichen. Im zweiten Validationsschritt wird das Modell "geschlossen", und als Modell-Inputs werden jetzt lediglich Wetterdaten verwendet. Als Eingabewerte in die Einzelkomponenten werden nun die rechnerischen Outputs der damit verknüpften Komponenten benutzt (vgl. Abb. 3.17). Abschließend findet wiederum ein Vergleich zwischen den Modell-Outputs der einzelnen Komponenten und den Meßwerten statt. Da die Anlage mit konstanten Massenströmen betrieben wird, ist es hinreichend, die In- und Output-Temperaturen der Einzelkomponenten zu untersuchen.

Für die Validation werden die Standardkennlinien der Vergleichsrechnungen /34/ in der folgenden einheitlichen Form dargestellt:

- Graphische Auftragung von Meß- und Rechenwert
- Angaben über die Anzahl n der Messungen
- Mittlerer Fehler in Kelvin berechnet nach:

$$\overline{\Delta T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} T_{i,Mess} - T_{i,Rechen} \qquad (4.1)$$

- Standardabweichung zwischen Messung und Rechnung

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^{n} (T_{i,Mess} - T_{i,Rechen})^2 - n \cdot \overline{\Delta T}^2 \right)} \qquad (4.2)$$

Um die Nachbildung verschiedener Betriebszustände zu überprüfen, wurden aufgrund des vorliegenden Datenmaterials drei unterschiedliche Meßreihen für die Validation benutzt:

- Betrieb des Kollektorfeldes nur mit kleinen Gebläsen,
- Betrieb des Kollektorfeldes und des Speichers mit allen Gebläsen,
- Langzeitverhalten des Speichers.

Die Lage der wichtigsten Meßstellen, auf die im folgenden Bezug genommen wird, zeigt Abbildung 4.2.

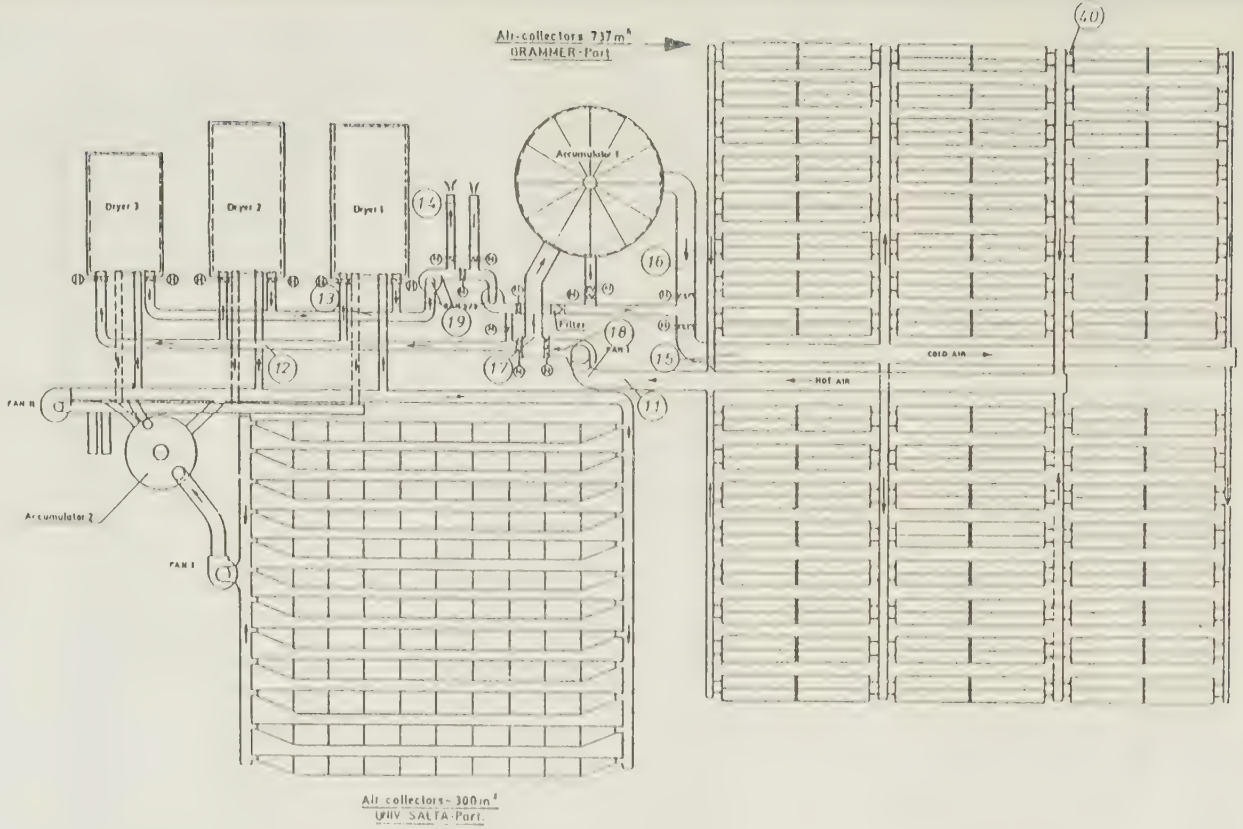


Abb. 4.2: Verteilung der wichtigsten Meßstellen

4.2 Ergebnisse der Validation

4.2.1 Betrieb des Kollektorfeldes mit den kleinen Gebläsen

Die Meßreihe wurde unter folgenden Randbedingungen durchgeführt: Der Bypass war geschlossen, d.h. an die Temperaturregelung werden keine Lastvorgaben gestellt, sondern lediglich bei konstanten Massenströmen die sich ergebenden Temperaturen registriert. Die Meßwerte über Ein- und Austrittsmassenströme des Kollektorfeldes lauten:

$$M_{EK} = 11\,160 \text{ kg/h},$$
$$M_{AK} = 4\,963 \text{ kg/h, d.h.}$$
$$M_{AK} = 0{,}4448 \cdot M_{EK}$$

Da das Kollektorfeld im Druckbetrieb arbeitet, wird Luft in die Umgebung geblasen. Die Eintrittswerte, Massenströme und Temperaturen sind an Meßstelle 15, die Austrittswerte an Meßstelle 11 aufgenommen worden (vgl. Abb. 4.2). Die zugrunde liegenden Daten wurden am 29.10.82 in der Zeit von 11.00 bis 13.00 Uhr im Abstand von 15 Minuten erfaßt. Abbildung 4.3 zeigt den Verlauf der Umgebungstemperatur, die sich während der Messung von 25,2 auf 28,7° C erhöht. In Abbildung 4.4 sind die zugehörigen Strahlungswerte auf die Kollektorfläche verzeichnet, die von 848,94 auf 1012,77 W/m^2 ansteigen.

Abbildung 4.5 (S. 84) gibt die mit dem Standarddatensatz versehenen Ergebnisse der Validation wieder: Über der Zeitachse sind die gemessenen Kollektorfeldeintrittstemperaturen T_{EKM}, die gemessenen Austrittstemperaturen T_{AKM} sowie die mit Hilfe der Kennlinie 3 (vgl. Abb. 3.11) berechneten Austrittstemperaturen T_{AKR} aufgetragen. Zu Beginn der Messung war die Luftaustauschstelle geschlossen, d.h. die Luft aus dem Kollektorfeld strömt durch den Trockner, kühlt sich dort ab und wird wieder ins Feld geleitet. In diesem Teilbereich ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung feststellbar.

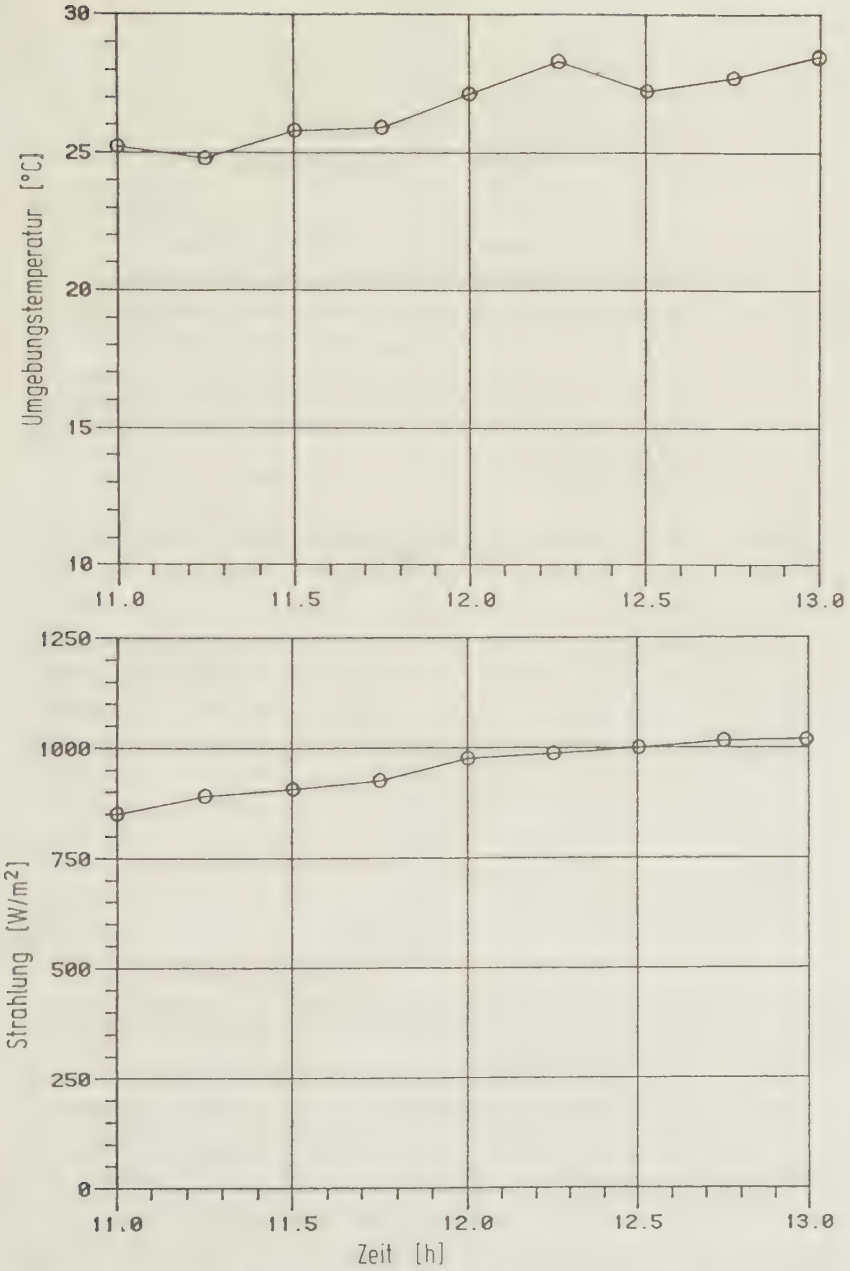


Abb. 4.3 u. 4.4: Verlauf der Umgebungstemperatur und Strahlung auf die Kollektorfläche über der Zeit aufgetragen bei Betrieb der kleinen Gebläse

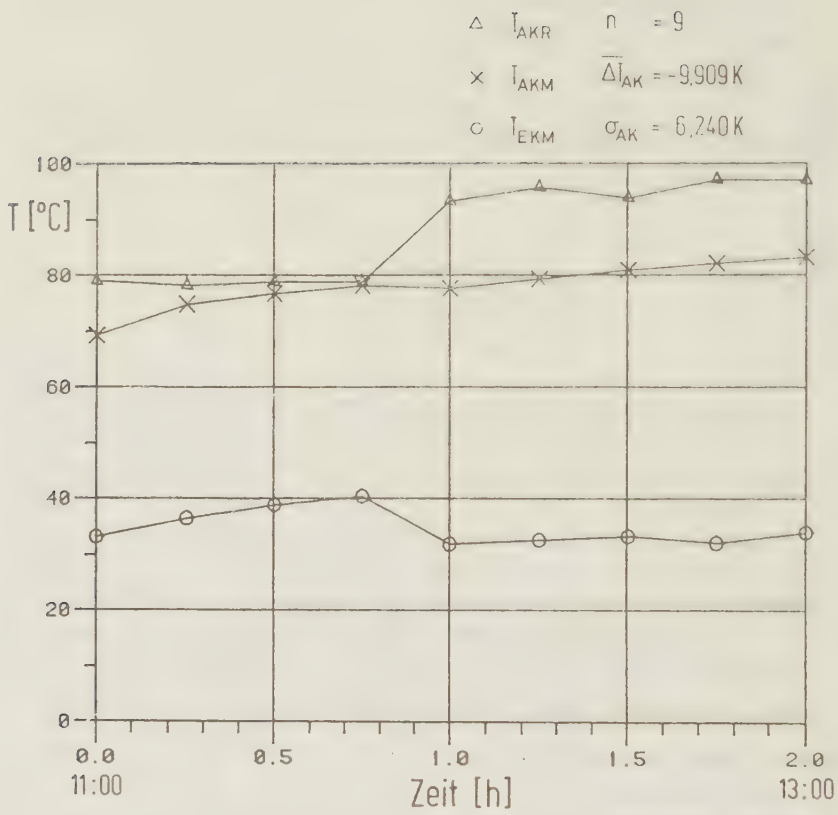


Abb. 4.5: Kollektoreintrittstemperaturen, gemessene und gerechnete Austrittstemperaturen bei Betrieb der kleinen Gebläse

Um 12.00 Uhr wurde die Luftaustauschklappe zum Teil geöffent, was durch den Abfall der Kollektoreintrittstemperatur - die aber immer noch über der Umgebungstemperatur liegt - angezeigt wird. Das Kollektorfeld reagiert auf diese Veränderung jedoch nicht, wie die mit zunehmender Strahlung steigenden Austrittstemperaturen beweisen. Dies hat seine Ursache darin, daß bei

Betrieb mit den kleinen Gebläsen der Massendurchsatz durch das Feld nicht sehr hoch und die gesamte Konstruktion bereits auf etwa 80° C aufgeheizt ist, so daß ein Abfall der Eintrittstemperatur um ca. 8° C das System nicht merklich beeinflußt.

Beim Rechenmodell hingegen, das kapazitive Effekte nicht berücksichtigt, steigt die Austrittstemperatur sofort beim Öffnen der Austauschklappen. Dies läßt sich dadurch erklären, daß sich durch die geringere Eintrittstemperatur bei gleichbleibender Strahlung und Umgebungstemperatur der Abszissenwert erniedrigt und sich somit der Wirkungsgrad erhöht (vgl. Abb. 3.11). Die gestiegenen Austrittstemperaturen berechnen sich nach der Wirkungsgradgleichung wie in Abb. 3.11 dargestellt, aufgelöst nach T_A.
Der Vergleich von Rechen- und Meßwerten zeigt, daß die Temperaturunterschiede im Bereich von 12 und 16° C liegen. Es ist zu erwarten, daß sich im realen Trocknungsbetrieb die Temperatur dann ebenfalls in dieser Größenordnung bewegen wird. Diese Abweichung hat auf das Gesamtergebnis der Simulationsrechnung jedoch nur marginalen Einfluß, da diese Betriebsart lediglich kurzzeitig am Spätnachmittag gefahren wird, wenn der Speicher bereits aufgeladen ist.
Der mittlere Fehler dieser 9 Messungen beträgt $\overline{\Delta T} = -9{,}9$ K, die Standardabweichung $\sigma = 6{,}24$ K.

4.2.2 Betrieb des Kollektorfeldes und des Speichers mit allen Gebläsen

In diesem Betriebszustand wird sowohl getrocknet als auch der Speicher geladen. Der Bypass ist geschlossen, die Luftaustauschstelle geöffnet. Die Messungen begannen um 13.15 Uhr, im Anschluß an die vorher beschriebene Reihe, und waren um 16.45 Uhr beendet. Insgesamt wurden 15 Messungen im Abstand von je 15 Minuten durchgeführt und folgende Massenströme registriert:

$\dot{M}_{EK}$ = 22 338 kg/h
$\dot{M}_{AK}$ = 25 822 kg/h
$\dot{M}_{AK} = 1{,}156 \cdot \dot{M}_{EK}$

$\dot{M}_{ESp}$ = 13 809 kg/h
$\dot{M}_{ASp}$ = 10 976 kg/h
$\dot{M}_{ASp} = 0{,}795 \cdot \dot{M}_{ESp}$

$\dot{M}_{Rohr}$ = 12 013 kg/h

Abbildung 4.6 zeigt den Verlauf der Umgebungstemperaturen, die zwischen 28,2 und 32,5° C liegen, und das zeitliche Verhalten der zugehörigen Strahlung auf die Kollektorfläche mit Werten zwischen 1030 und 347 W/m², das in Abbildung 4.7 veranschaulicht ist. Der plötzliche Strahlungsabfall in der 3. Stunde des Meßzyklus, dessen Auswirkungen im folgenden diskutiert werden, ist auf eine Wolke zurückzuführen.

In Abbildung 4.8 (S. 88) sind analog zu Abbildung 4.5, aufgetragen über der Zeit, die gemessenen Kollektoreintrittstemperaturen sowie die gemessenen und gerechneten Austrittstemperaturen dargestellt; den Rechnungen liegt Kennlinie 2 aus Abbildung 3.11 zugrunde. Für die zu Beginn der Reihe festgestellte Differenz zwischen dem Meß- und Rechenwert von 19,18° C sind kapazitive Effekte geltend zu machen, die vom Rechenmodell nicht erfaßt werden und die daher rühren, daß das Kollektorfeld insgesamt durch die vorherige Betriebsweise der kleinen Gebläse aufgeheizt ist. Nach etwa einer halben Stunde ist das Feld jedoch wieder soweit abgekühlt, daß die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung nur noch ca. 2° C betragen. Nach 15 Minuten steigt die Kollektoreintrittstemperatur von 40,0 auf 46,3° C, die Austrittstemperatur sinkt gleichzeitig von 93,4 auf 84,0° C, während sich der errechnete Austrittswert von 73,6 auf 75,6° C erhöht. Beim vorhergehenden Validationslauf (vgl. Abb. 4.5) war die errechnete Austrittstemperatur beim Absinken der Eintrittstemperatur gestiegen; dies konnte anhand der Gleichungen für den Wirkungsgrad und die Kennlinie 3 verifiziert werden. Daß jetzt die Austrittstemperatur auch bei einer Vergrößerung der Eintrittstemperatur nur geringfügig steigt, liegt an dem großen Massenstrom bei Betrieb aller Gebläse und der steileren Kennlinie 2 (vgl. Abb. 3.11).

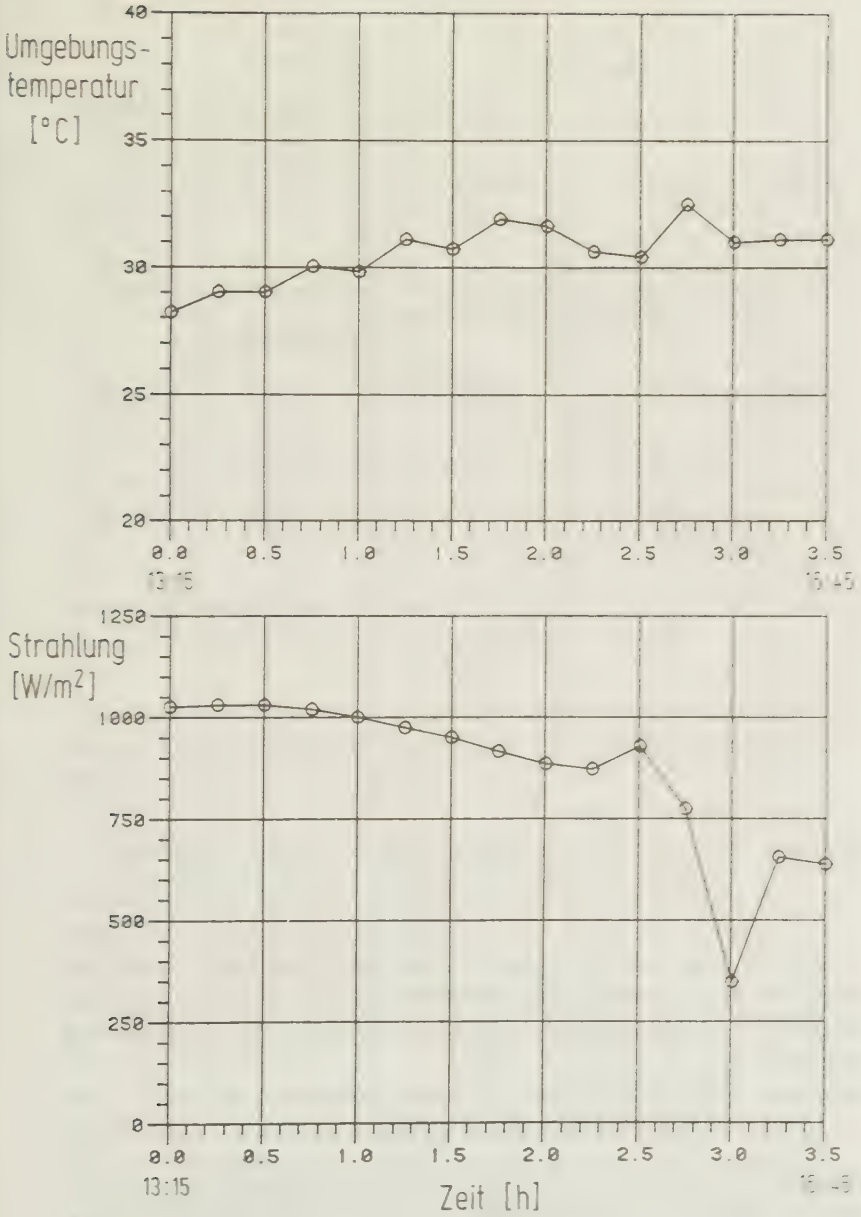


Abb. 4.6 u. 4.7: Verlauf der Umgebungstemperatur und Strahlung auf die Kollektorfläche über der Zeit aufgetragen bei Betrieb aller Gebläse

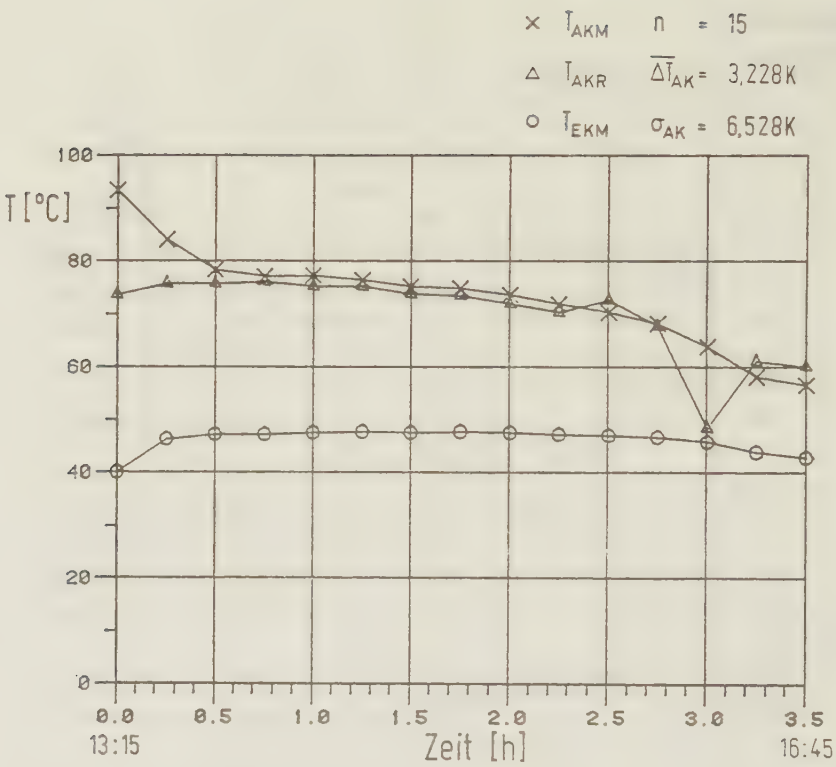


Abb. 4.8: Kollektoreintrittstemperaturen, gemessene und gerechnete Austrittstemperaturen bei Betrieb aller Gebläse

Bei der 3. Meßstunde ist der Einfluß der plötzlich sinkenden Strahlung zu erkennen; der Rechenwert fällt sofort ab, obwohl das Kollektorfeld in seinem Temperaturverhalten nicht darauf reagiert.
Insgesamt beläuft sich der mittlere Fehler bei 15 Messungen auf 3,228 K, die Streuung auf 6,528 K.

Abbildung 4.9 zeigt, daß sich die Rohrleitungsverluste mit dem Rechenmodell ausgesprochen gut nachbilden lassen, was der mittlere Fehler aus 15 Messungen von 0,45 K und einer Streuung von 0,795 K belegt.

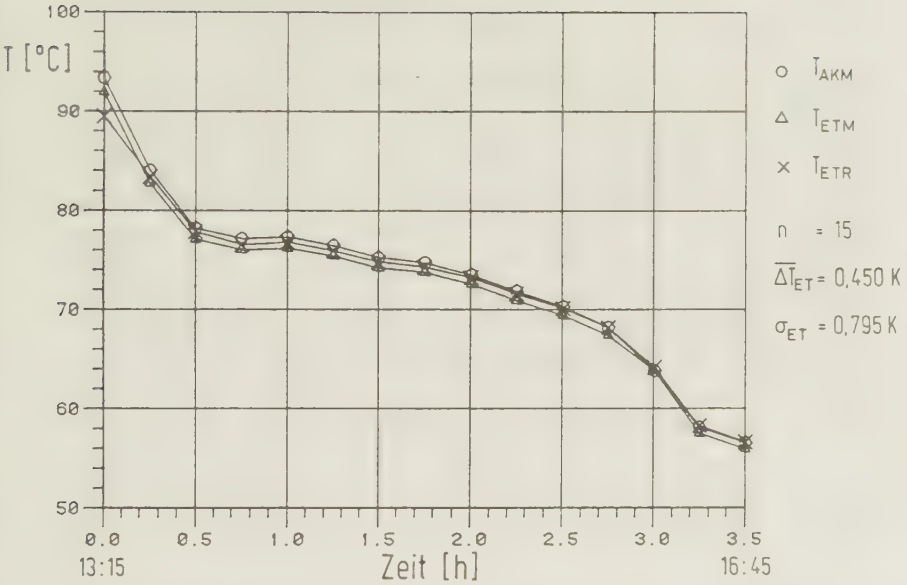


Abb. 4.9: Rohrleitungsverluste bei Betrieb aller Gebläse

4.2.3 Langzeitverhalten des Speichers

Da die Datenerfassung während dieser Untersuchung zum Teil ausfiel, bereitet die Validation des Kiesbettspeichers erhebliche Probleme. Aufgrund der Trägheit der Speichermasse werden für den Gültigkeitstest Langzeitmessungen benötigt. Sie begannen, wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben, am 29.10.82 um 13.15 Uhr und endeten am 1.11.82 um 17.15 Uhr, so daß Werte über einen Zeitraum von 52 Stunden vorliegen, die in 15minütigen Intervallen aufgenommen wurden. Wegen technischer Schwierigkeiten fielen jedoch gleich am ersten Tage die meisten Kanäle der Datenerfassung aus, so daß lediglich die Strahlung auf die Kollektorfläche und die Temperatur der Meßstelle 40 registriert werden konnten. Aus diesen Da-

ten wurde, aufbauend auf vorherige Messungen, eine Speichereintrittstemperatur synthetisiert (vgl. T_{ES} in Abb. 4.10), deren Zuverlässigkeit jedoch nur bedingt verifizierbar ist. Es wurde angenommen, daß des Nachts die Temperatur am Speichereintritt der Umgebungstemperatur entspricht. Tagsüber wurde aus den Werten der Strahlung und denen der an der Meßstelle 40 aufgenommenen Temperaturen eine Speichereintrittstemperatur für die Meßstelle 17 bestimmt. Um einen Vergleich zwischen Meß- und Rechenwerten zu ermöglichen, wurden zusätzlich durch einen anderen Datenlogger Speicherprofile aufgezeichnet. In Abbildung 4.10 ist der Verlauf der gemessenen Speicheraustrittstemperaturen (Meßstelle 16 in Abb. 4.2) zusammen mit den berechneten Austrittstemperaturen und den synthetisierten Eintrittstemperaturen dargestellt. Aus 209 Werten ergibt sich der mittlere Fehler $\overline{\Delta T}_{AS}$ zu - 0,219 K und die Streuung σ_{AS} zu 2,552 K. An den Stellen 1 bis 5 sind die gemessenen und errechneten Speicherprofile untersucht worden.

Bei den Profilen 1, 2, 3 und 5 sind zum Teil große Abweichungen zwischen den Meß- und Rechenwerten zu verzeichnen. Da Abbildung 10 zeigt, daß Rechen- und Meßwerte am Speicheraustritt während des Langzeitversuchs gut übereinstimmen, dürften für die Abweichungen bei den Einzelprofilen folgende Gründe ausschlaggebend sein:

- Die Fühler messen zum Teil falsch, weil sie beschädigt oder nicht geeicht sind, was sich besonders deutlich an dem Fühler in 75 cm Tiefe ablesen läßt.

- Die angegebenen Positionen der Fühler entsprechen nicht der wirklichen Lage im Kiesbett.

- Die Annahme einer über dem Querschnitt des Kiesbettes gleichen Strömungsgeschwindigkeit trifft nicht zu.

4.2.4 Zusammenschluß der Komponenten

Die Untersuchung der Einzelkomponenten belegt, daß bei der Nachbildung des Kollektorfeldes bei Betrieb der kleinen Gebläse die Streuung 6,24 K beträgt. Dies ist jedoch für den Gesamtbetrieb wenig relevant, da diese Betriebsart nur ca. zwei Stunden pro Tag gefahren wird. Bei Betrieb aller Gebläse ergibt sich eine Streuung von 6,528 K, deren Ursache in der Nichterfassung kapazitiver Effekte begründet liegt und auf die ausführlich in Kapitel 3.1.3 b) eingegangen worden ist. Die Nachbildung der Rohrleitung weist dagegen nur eine Streuung von 0,795 K auf.

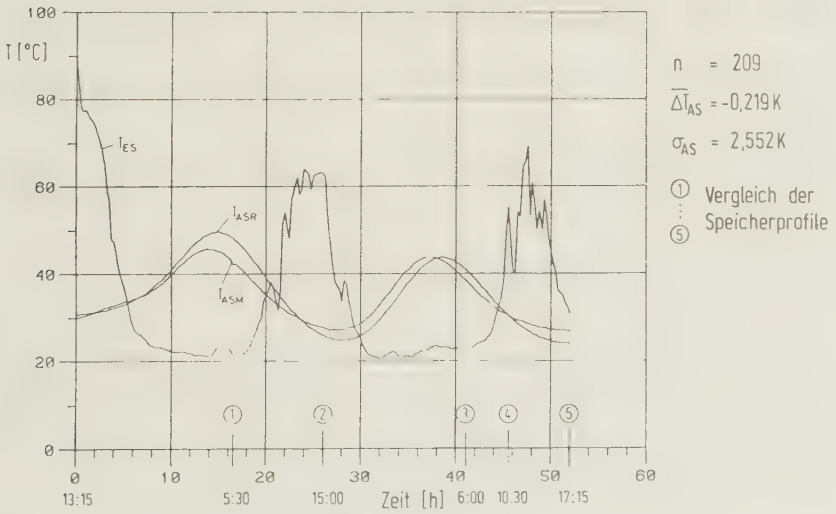


Abb. 4.10: Langzeitverhalten des Kiesbettspeichers, gemessene Speichereintrittstemperaturen, Vergleich von gemessenen und gerechneten Austrittstemperaturen

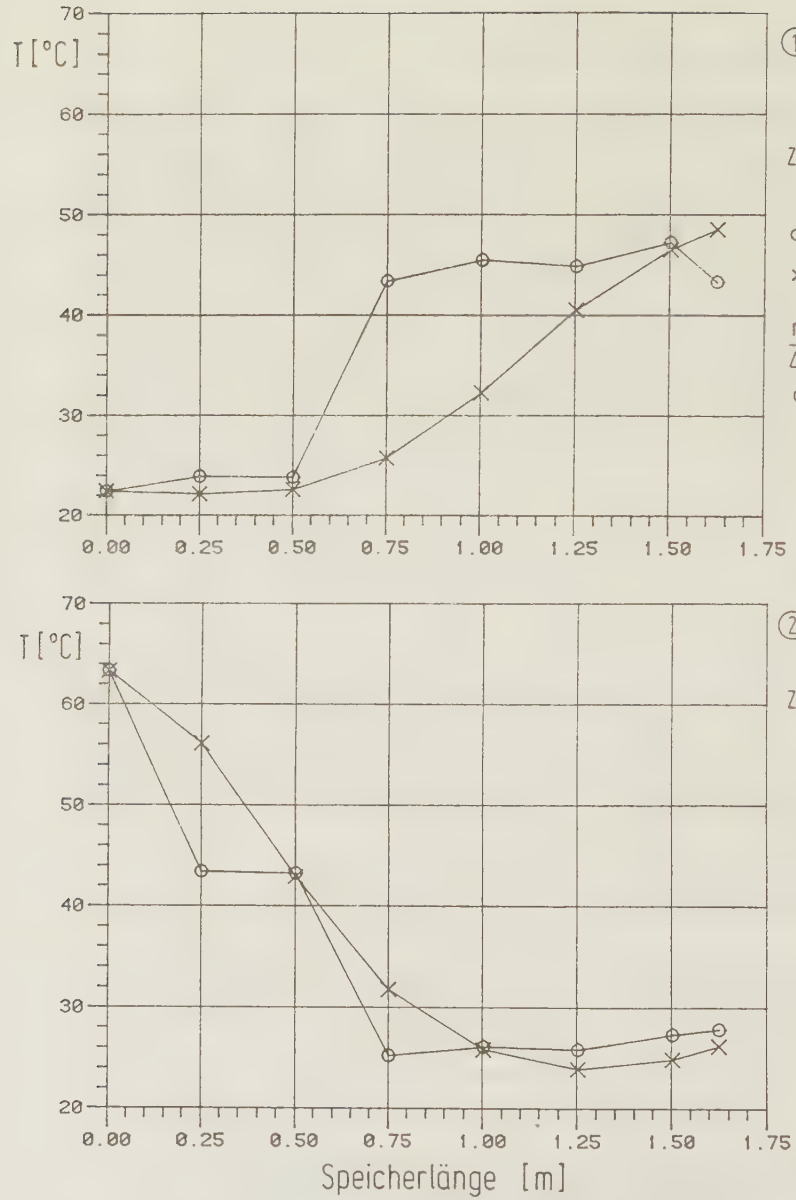


Abb. 4.11 u. 4.12: Vergleich der gemessenen und berechneten Speicherprofile ① und ②

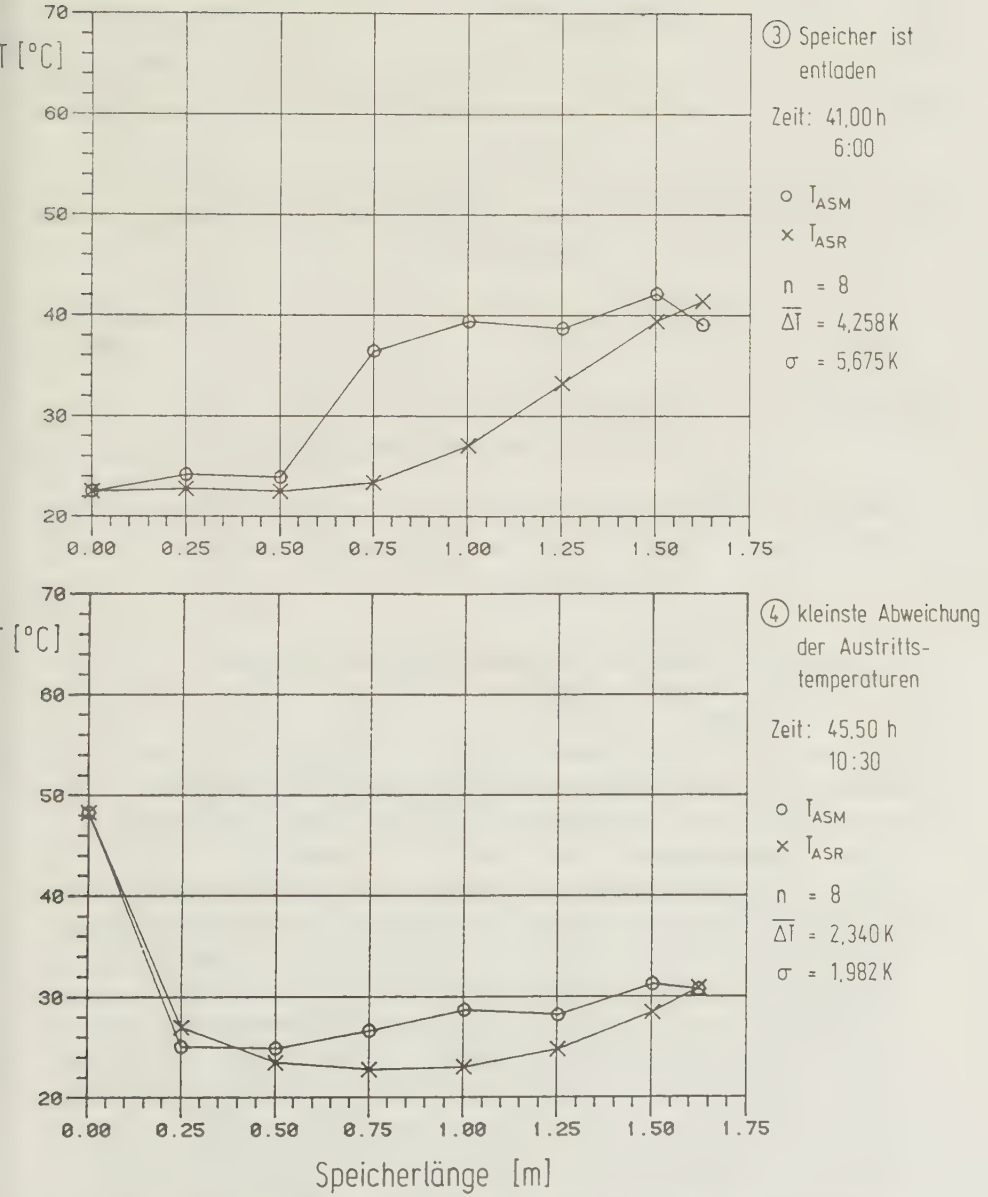


Abb. 4.13 u. 4.14: Vergleich der gemessenen und berechneten Speicherprofile ③ und ④

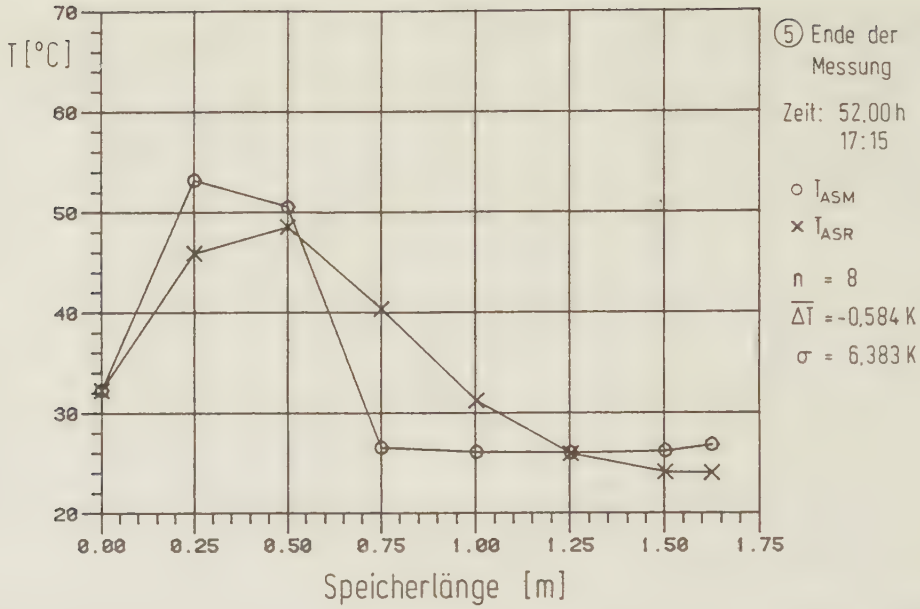


Abb. 4.15: Vergleich der gemessenen und berechneten Speicherprofile ⑤

Im folgenden soll untersucht werden, wie sich die Rechenergebnisse der Komponenten von den Meßwerten unterscheiden, wenn das Modell, wie in Kapitel 3.2, Abbildung 3.17, dargestellt, "zusammengeschlossen" wird. In diesem Fall wird die Kollektoreintrittstemperatur durch den großen Massenstrom am Speicheraustritt stark beeinflußt, und die errechnete Kollektoraustrittstemperatur, die die Speichereintrittstemperatur bildet, bewirkt, daß hier ein Rückkopplungseffekt auftritt. Abbildung 4.16 zeigt, daß die errechneten Kollektoreintrittstemperaturen gering über den Meßwerten liegen, $\overline{\Delta T}_{EK}$ = 1,537 K, σ_{EK} = 1,476 K, während die errechneten Austrittstemperaturen unter den Meßwerten $\overline{\Delta T}_{AK}$ = 2,95 K, σ_{AK} = 6,44 K bleiben. Da die Komponente Rohrleitung mit den gerechneten Kollektoraustrittstemperaturen arbeitet, werden folglich auch die Abwei-

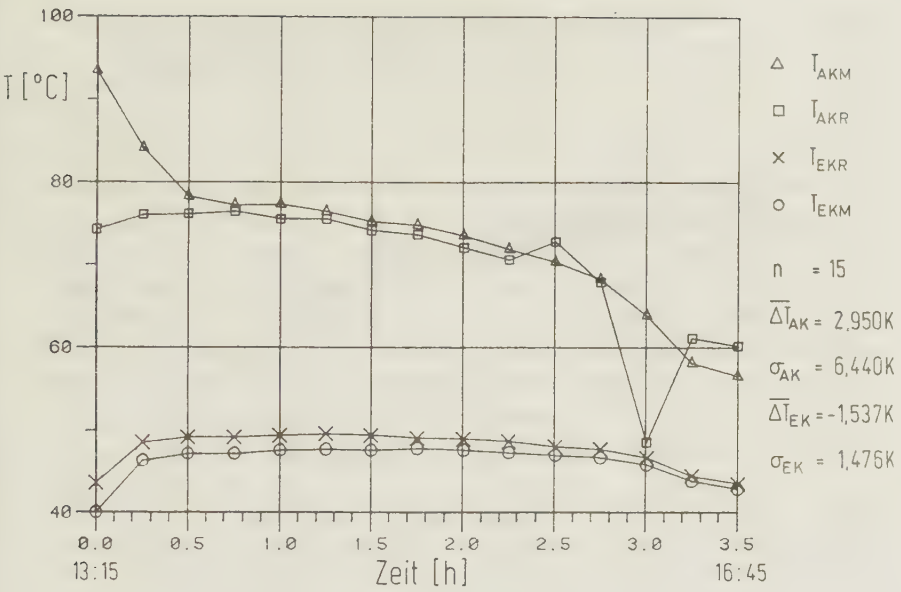


Abb. 4.16: Vergleich der gemessenen und berechneten Kollektorein- und -austrittstemperaturen bei Betrieb aller Gebläse und Verknüpfung der Komponenten

chungen bei den Rohrleitungsverlusten größer (vgl. Abb. 4.17). Es ergeben sich nachstehende Daten: $\overline{\Delta T}_{ET}$ = 3,385 K, σ_{ET} = 5,83 K.

Abschließend läßt sich feststellen, daß die Abweichungen von den Meßwerten für das in Kapitel 3 beschriebene Modell der Solaranlage mit ca. ± 6 K anzusetzen sind. Diese Diskrepanz ist nicht sehr groß. Wäre das Datenerfassungssystem während der Langzeitmessung nicht ausgefallen, hätte jedoch der Verlauf der Speichertemperaturen genauer analysiert und das Gesamtverhalten der Anlage noch besser validiert werden können. Da über den Trockner sowie den Trocknungszyklus keine Daten vorliegen, muß bei der Simulation der Gesamtanlage von den in Kapitel 3 getroffenen Annahmen ausgegangen werden.

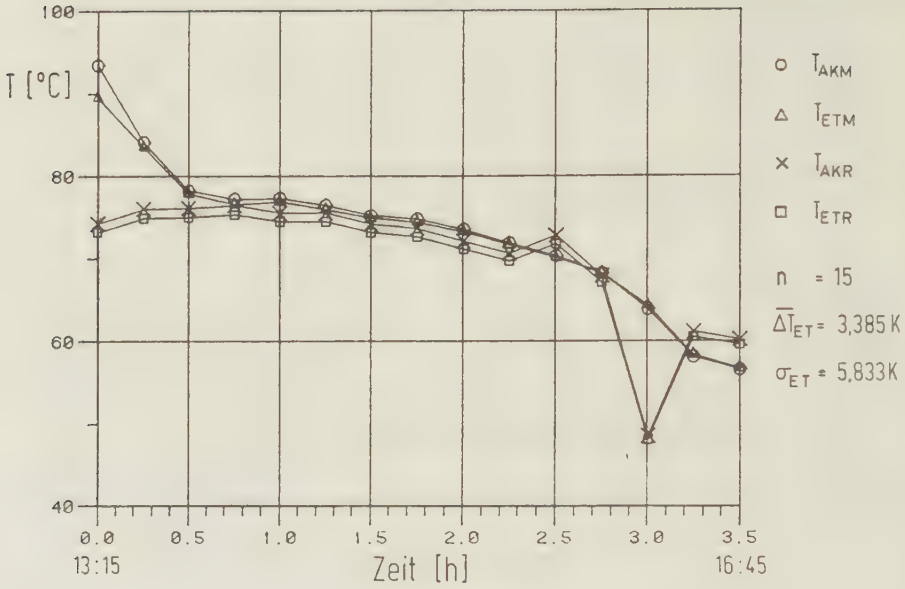


Abb. 4.17: Vergleich der gemessenen und gerechneten Rohrein- und -austrittstemperaturen bei Betrieb aller Gebläse und Verknüpfung der Komponenten

5. Untersuchung und Voraussage des Anlagenverhaltens unter variablen Bedingungen

5.1 Wetterbedingungen

Um das Verhalten einer Solaranlage simulieren zu können, sind für den zu betrachtenden Zeitraum Datensätze erforderlich, die hinreichend Auskunft über die Witterungsbedingungen geben. Je nach Aggregationszustand eines Simulationssystems werden unterschiedliche Datendichten verlangt. Viele Simulatoren arbeiten mit Tages-, Wochen- oder Monatssummen von Strahlung und Temperatur. TRNSYS hingegen benötigt stündliche Werte von Umgebungstemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Strahlung, d.h. für einen Jahreszyklus werden insgesamt 8760 Datensätze gefordert.

Aus Salta existiert nur e i n kompletter Jahreswetterdatensatz, gemessen auf der landtechnischen Station in Cerrillos, wo die Solaranlage installiert ist. Bei den Daten, die 1971 aufgenommen wurden, handelt es sich um Tagessummen der Strahlung, Minima, Maxima und Durchschnittswerte von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit. Zusätzlich wurden die Zeiten des Sonnenauf- und -untergangs sowie die durchschnittliche Bewölkung registriert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Programmsystem erstellt, das aus vorgegebenen komprimierten Datensätzen (Tages-, Wochen-, Monatssummen) Stundenwerte entwickelt. Das Verfahren, das von D.J. CLOSE /61/ stammt, soll am Beispiel der Strahlungsberechnung kurz erläutert werden:
Zunächst erfolgt eine Umrechnung in Tagessummen. Liegen Daten über Sonnenauf- und -untergang vor, so wird über dieses Intervall eine Sinuskurve aufgespannt, deren Integral die Tagessumme bildet. Fehlen diese Informationen, so wird die Zeit der Sonnenscheindauer mit 8 Stunden festgelegt, beginnend um 6.00 und endend um 18.00 Uhr. Enthält der Wetterdatensatz eine Angabe über die Bewölkung, so wird - falls diese höher als 50 % ist - die Sinuskurve mit einer hochfrequenten

Cosinuskurve überlagert, um den Einfluß der Bewölkung auf die Strahlungsverteilung wiederzugeben. Abbildung 5.1 zeigt die Tagessumme der Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche für den hier synthetisierten Jahreszyklus und Abbildung 5.2 die zugehörigen Tagesminima und -maxima der Temperaturen.

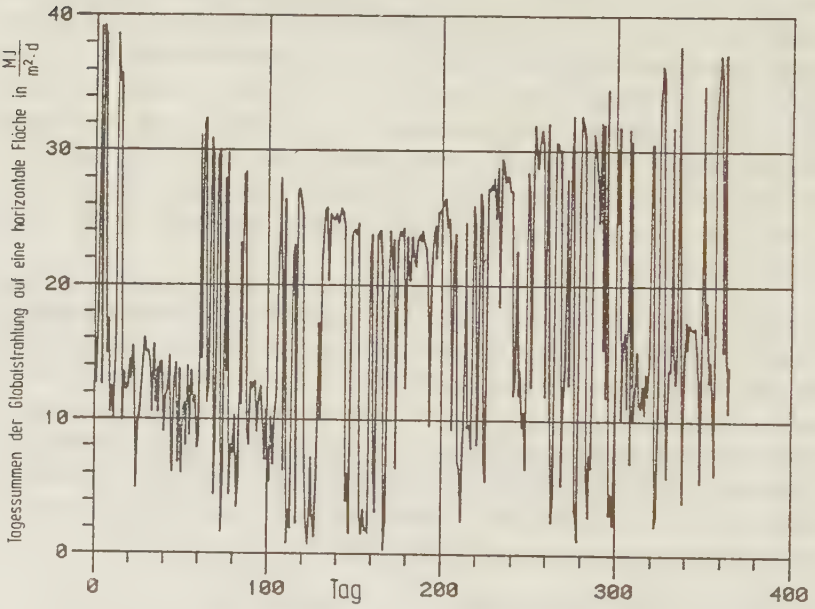


Abb. 5.1: Tagessummen der Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche (Jahreszyklus)

Für die Simulationen wurden die Wetterdaten der ersten Januarwoche benutzt (Abb. 5.3 und 5.4, S.100). Dieses Zeitintervall liegt mitten in der Trocknungssaison und kann damit als repräsentativ gelten. In den ersten fünf Tagen ergibt sich für die Globalstrahlung eine mittlere Tagessumme von 22,68 MJ/(m^2 d), die der Auslegungsrechnung /35/ von ca. 20,0 MJ/(m^2 d) nahekommt und somit einen ungefähren Vergleich erlaubt. Zusätzlich wurde ein "Schönwetterdatensatz" für eine Woche generiert, der

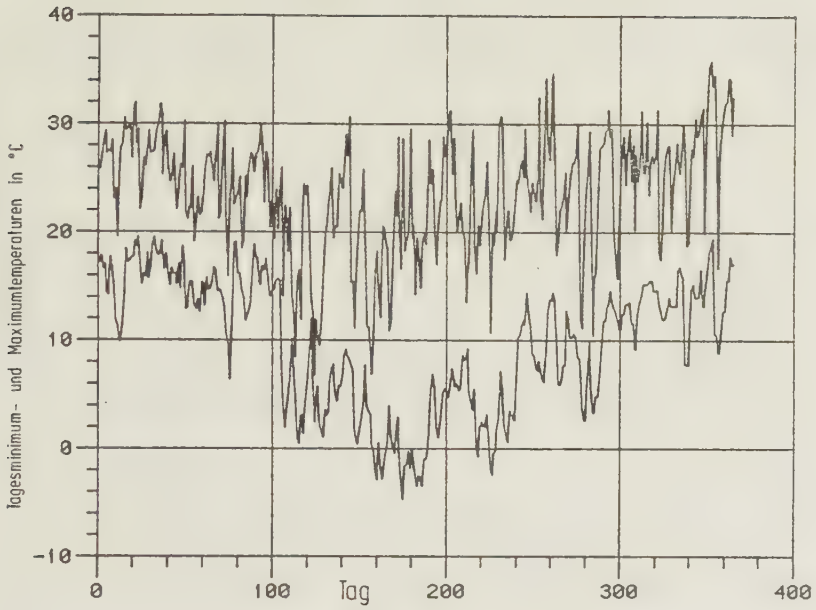


Abb. 5.2: Tagesminimum- und -maximumtemperaturen (Jahreszyklus)

aneinandergereiht die Werte des 3. Januartages enthält. Die Tagessumme der Globalstrahlung beträgt 35,16 MJ/(m^2 d). Diese Angaben bilden die Voraussetzung, um bei gleichen Anlagenkonfigurationen den Einfluß geänderter Witterungsbedingungen untersuchen zu können.

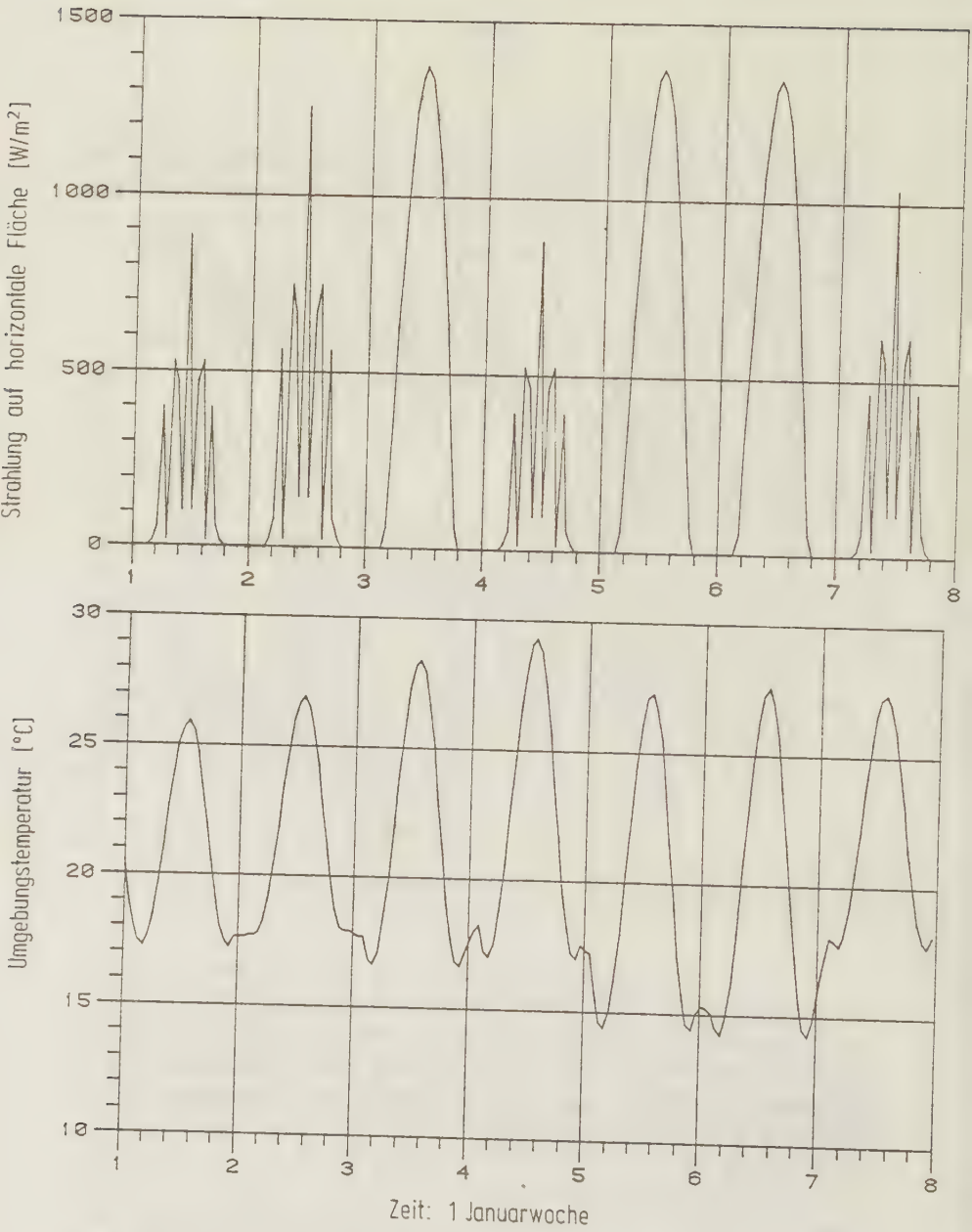


Abb. 5.3 u. 5.4: Verlauf der Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche sowie der Umgebungstemperatur während der 1. Januarwoche

5.2 Basisanlagenkonfiguration

Unter diesem Begriff wird die Zusammenfassung der wichtigsten Komponenten verstanden, wie sie sich aufgrund der vorliegenden Daten darstellen.

► Kollektorfeld

Gesamtfläche: 737 m^2; Betrieb mit Kennlinien 2 und 3 (Abb. 3.11).

► Speicher

Höhe des Kiesbettes: 1,625 m; Gesamtdurchmesser: 10 m, davon 7 cm Hartschaumisolation auf der Außenhülle; Volumen: 124 m^3; Kapazität: 0,168 m^3 Speicher/m^2 Kollektorfläche.

► Trockner

Fassungsvermögen: 10 t Tabak; interne Luftumwälzmenge: 3200 kg/h; Trocknungsprozeß entsprechend Abbildung 3.5 und Tabelle 3.1.

Die Simulation dieser Konfiguration wird als Standardlauf bezeichnet, mit dessen Ergebnissen alle Anlagenmodifikationen verglichen und bewertet werden.

Aufgrund der Ausführungen in Kapitel 3.1.2 c) über die Temperaturvorgaben durch den Trocknungsprozeß wird jeder Simulationslauf in zwei verschiedenen Modi gefahren: Bei Mode 1 wird die Temperaturvorgabe, wie in Abbildung 3.5 und Tabelle 3.1 dargestellt, benutzt, bei Mode 2 werden die entsprechend höheren Solltemperaturen als Vorgabe verwendet (Tab. 3.2, Spalten 7 und 8). Das Anlagenverhalten soll durch zwei dimensionslose Kennzahlen bewertet werden, dem solaren Deckungsanteil und dem Grad der Lasterfüllung. Der solare Deckungsanteil (SF) ist wie folgt definiert:

$$SF = \frac{Q_{Solar}}{Q_{ges}} \qquad (5.1)$$

mit Q_{Solar} als Anteil der Solarenergie am Gesamtenergieverbrauch des Prozesses. Die pro Zeiteinheit dem Trockner zugeführte Solarenergie ist definiert als:

$$\dot{Q}_{Solar} = \dot{M}_{ET} \cdot c_{pL} \cdot (T_{ET,real} - T_{E,Solar}) \qquad (5.2)$$

mit $T_{E,Solar}$ als Eintrittstemperatur des Luftstroms in die Solaranlage nach der Luftaustauschstelle.

$$Q_{ges} = Q_{Solar} + Q_{Zus} + Q_G \qquad (5.3)$$

und Q_{ges} als Summe aus Solarenergie, Zusatzenergie (verbraucht durch den im Trockner eingebauten Brenner) und der für den Betrieb der Gebläse der Solaranlage benötigten Hilfsenergien.

Der solare Deckungsanteil ist also ein Indikator dafür, wieviel der für den Trocknungsprozeß erforderlichen Energie substituiert werden kann. Der Grad der Lasterfüllung gibt an, wie gut die Solaranlage die vorgegebene Laststruktur erfüllt, und ist definiert als:

$$\text{Lasterfüllung} = \frac{Q_{Solar,real}}{Q_{Solar,Soll}} \qquad (5.4)$$

Im Nenner steht die für die Erfüllung der Trocknungsaufgabe notwendige Wärmemenge, die die Solaranlage zu liefern hat. Die pro Zeiteinheit dem Trockner zuzuführende Wärmemenge ist definiert als:

$$\dot{Q}_{Solar,Soll} = \dot{M}_{ET} \cdot c_{pL} \cdot (T_{ET,Soll} - T_{E,Solar}) \qquad (5.5)$$

Der Zähler gibt an, wie groß die wirklich gelieferte Wärmemenge ist. Sie wird zum einen durch Leckagen beeinflußt, d.h. der geforderte Massenstrom wird nicht erreicht, und zum anderen durch die Nichteinhaltung der Solltemperatur. Die erbrachte Trocknereintrittstemperatur kann zu niedrig sein, wenn das

Solarsystem nicht auf einem ausreichenden Temperaturniveau arbeitet, oder zu hoch, was unter Umständen bei einem Oszillieren der Regelung kurzzeitig möglich ist. Gleichung (5.2) gibt also an, welchen Anteil an der geforderten Energiemenge das Solarsystem bereitgestellt hat.

Im folgenden werden die Ergebnisse des Standardlaufes, Mode 1, dargestellt und diskutiert. Die wichtigsten Daten für den Trocknungszyklus sind Tabelle 5.1 zu entnehmen. Die drei Trocknungsphasen sind getrennt aufgeführt; die letzte Zeile repräsentiert die Ergebnisse des Gesamtprozesses. Spalte 7 zeigt den Energieverbrauch für den Wasserentzug am Tabak und belegt, daß der Leistungsbedarf für die zweite Trocknungsphase am größten ist (vgl. Abb. 3.7). Die Gesamtmenge von $3{,}125 \cdot 10^7$ kJ entspricht einem Ölverbrauch von 0,86 l pro kg getrocknetem Tabak. Spalte 6 enthält die für den Prozeß aufgewendete Gesamtenergiemenge. Sie setzt sich wie in Gleichung (5.3) beschrieben zusammen. Ihr Wert gleicht dem Energieverbrauch von 1,04 l Öl pro kg getrocknetem Tabak. Es ist zu beachten, daß die Werte von Spalte 6 abzüglich der benötigten Energie nicht den Wert von Spalte 7 ergeben, sondern darüber liegen. Dies erklärt sich dadurch, daß die Luft im Solarsystem von der Eintrittstemperatur $T_{E,Solar}$ nach Luftaustausch auf die geforderte Trocknereintrittstemperatur erwärmt werden muß. Deshalb ist der Wert von

$$\dot{M}_{ET} \cdot c_{pL} \cdot (T_{ET} - T_{E,Solar})$$

größer als der Wert von

$$\dot{M}_{IT} \cdot c_{pL} \cdot (T_{IT} - T_{AT})$$

aus Gleichung (3.9). Nur wenn gilt $T_{E,Solar} = T_{AT}$, d.h. keine Luft ausgetauscht wird, ist die Bedingung

$$\dot{M}_{ET} \cdot c_{pL} \cdot (T_{ET} - T_{E,Solar}) = \dot{M}_{IT} \cdot c_{pL} \cdot (T_{IT} - T_{AT}) \quad (5.6)$$

erfüllt.

Tab. 5.1: Ergebnisse des Standardlaufs, Mode 1 (Energiemengen in kJ)

Trocknungs-abschnitt	Energieverbrauch kl. Gebläse	Energieverbrauch gr. Gebläse	Gesamt-strahlung	Q_{Solar}	Q_{Zusatz}	Q_{Gesamt}	Q_{Tabak}	SF	Q_{Last}	Lasterfüllung
I	$5{,}443 \cdot 10^5$	$1{,}944 \cdot 10^5$	$2{,}011 \cdot 10^7$	$2{,}083 \cdot 10^6$	$4{,}751 \cdot 10^6$	$7{,}572 \cdot 10^6$	$6{,}153 \cdot 10^6$	0,27	$2{,}106 \cdot 10^6$	0,98
II	$6{,}653 \cdot 10^5$	$3{,}672 \cdot 10^5$	$3{,}390 \cdot 10^7$	$6{,}765 \cdot 10^6$	$1{,}635 \cdot 10^7$	$2{,}415 \cdot 10^7$	$2{,}083 \cdot 10^7$	0,28	$6{,}789 \cdot 10^6$	0,99
III	$6{,}048 \cdot 10^5$	$1{,}620 \cdot 10^5$	$2{,}953 \cdot 10^7$	$6{,}338 \cdot 10^5$	$4{,}806 \cdot 10^6$	$6{,}206 \cdot 10^6$	$4{,}262 \cdot 10^6$	0,10	$2{,}374 \cdot 10^6$	0,27
Gesamt	$1{,}814 \cdot 10^6$	$7{,}236 \cdot 10^5$	$8{,}354 \cdot 10^7$	$9{,}482 \cdot 10^6$	$2{,}591 \cdot 10^7$	$3{,}793 \cdot 10^7$	$3{,}124 \cdot 10^7$	0,25	$1{,}127 \cdot 10^7$	0,84

Tab. 5.2: Ergebnisse des Standardlaufs, Mode 2 (Energiemengen in kJ)

Trocknungs-abschnitt	Energieverbrauch kl. Gebläse	Energieverbrauch gr. Gebläse	Gesamt strahlung	Q_{Solar}	Q_{Zusatz}	Q_{Gesamt}	Q_{Tabak}	SF	Q_{Last}	Lasterfüllung
I	$5{,}443 \cdot 10^5$	$2{,}916 \cdot 10^5$	$2{,}011 \cdot 10^7$	$4{,}501 \cdot 10^6$	$2{,}330 \cdot 10^6$	$7{,}667 \cdot 10^6$	$6{,}153 \cdot 10^6$	0,59	$6{,}824 \cdot 10^6$	0,66
II	$6{,}653 \cdot 10^5$	$5{,}724 \cdot 10^5$	$3{,}390 \cdot 10^7$	$7{,}975 \cdot 10^6$	$1{,}515 \cdot 10^7$	$2{,}436 \cdot 10^7$	$2{,}083 \cdot 10^7$	0,33	$2{,}310 \cdot 10^7$	0,35
III	$6{,}048 \cdot 10^5$	$1{,}728 \cdot 10^5$	$2{,}953 \cdot 10^7$	$5{,}269 \cdot 10^5$	$4{,}913 \cdot 10^6$	$6{,}217 \cdot 10^6$	$4{,}262 \cdot 10^6$	0,08	$5{,}440 \cdot 10^6$	0,10
Gesamt	$1{,}814 \cdot 10^6$	$1{,}037 \cdot 10^6$	$8{,}354 \cdot 10^7$	$1{,}300 \cdot 10^7$	$2{,}239 \cdot 10^7$	$3{,}824 \cdot 10^7$	$3{,}124 \cdot 10^7$	0,34	$3{,}536 \cdot 10^7$	0,37

Dies kann dadurch nachgewiesen werden, daß $T_{E,Solar} = T_{AT}$ angenommen wird, für $\dot{M}_{IT}$ die Gleichung (3.2) benutzt, die Gleichung (3.3) nach T_{IT} aufgelöst und in Gleichung (5.6) eingesetzt wird. Für den Fall, daß der Luftaustausch geöffnet ist, ergibt $T_{E,Solar}$ einen niedrigeren Wert als T_{AT}, und die linke Seite von Gleichung (5.6) wird größer als die rechte.

Den Spalten 1, 2 und 3 ist zu entnehmen, daß der Energieaufwand für den Betrieb der Gebläse ca. 27 % der bereitgestellten Solarenergie beträgt. Subtrahiert man die für den Betrieb der Gebläse notwendige Energie von der gelieferten Solarenergie und dividiert durch die auf die Kollektorfläche fallende Strahlung, so ergibt sich ein rechnerischer Wirkungsgrad der Solaranlage von 8,3 %. Für den Gesamtprozeß ist für Mode 1 ein solarer Deckungsanteil von 25 % bei einer Lasterfüllung von 84 % festzuhalten.

Tabelle 5.2 (S. 104) zeigt die Ergebnisse des Standardlaufs, Mode 2. Aufgrund der erhöhten Lastanforderung von $3{,}536 \cdot 10^7$ kJ im Vergleich zu $1{,}127 \cdot 10^7$ kJ in Mode 1 kann die Solaranlage bei einer gesunkenen Lasterfüllung von 36,7 % - in Mode 1 betrug sie 84 % - nun 34 % des Gesamtenergiebedarfs decken. Der nur unwesentliche Anstieg des Gesamtenergiebedarfs ist darauf zurückzuführen, daß das große Gebläse über eine längere Zeitspanne eingeschaltet war, um den Speicher aufzuladen. Das bedeutet, daß durch eine einfache Änderung der Vorgabetemperaturen der solare Deckungsanteil von 25 % auf 34 % gesteigert werden kann. Auf eine Untersuchung der Eintrittsfeuchte muß hier verzichtet werden, da - wie in Kapitel 3.1.7 ausgeführt - wegen der Leckagen eine Feuchteregelung nicht möglich und zudem das Trocknermodell nicht in der Lage ist, derartige Änderungen zu verarbeiten.

5.3 Solarer Deckungsanteil und Lasterfüllung in Abhängigkeit von Anlagenmodifikationen

In diesem Kapitel werden folgende Systemänderungen behandelt:

- Erhöhung der Massenströme von 24 000/8000 kg/h auf die in der Auslegung vorgesehenen Werte 39 000/13 000 kg/h bei verschiedenen Betriebszuständen;
- Änderung der Rezirkulationsrate im Trockner sowie der Trocknerverluste;
- Variation der Leckraten;
- Benutzung unterschiedlicher Kennlinien.

Zusätzlich werden dem Modell die in Kapitel 5.1 dargestellten "Schönwetterdaten" als Inputs aufgegeben.

Um eine Vergleichbarkeit der Reaktionen des Solarsystems auf diese Modifikationen zu gewährleisten, wurde die Basiskonfiguration mit der dafür konzipierten Regelung beibehalten, jedoch die Temperaturvorgabe von Mode 1 zu Mode 2 geändert. Tabelle 5.3 repräsentiert die Ergebnisse von insgesamt 36 Rechenläufen; Spalte 1 gibt die Laufnummer*) an, Spalte 2 die Konfiguration. In den folgenden 5 Spalten sind die Modifikationen und ihre Einflüsse auf den solaren Deckungsanteil und die Lasterfüllung in Mode 1 und 2 aufgelistet.

Dieser Satz von Simulationsläufen ist in vier Blöcke strukturiert. Bei den ersten 12 Läufen wird die Anlage ohne Leckagen betrieben. Läufe 1 bis 6 und 7 bis 12 sind identisch bis auf die benutzte Kollektorkennlinie. Für die ersten 6 Läufe wird

---

* Sie wird im folgenden mit L bezeichnet und mit der dazugehörigen Nummer versehen. Beispiel: L 13 entspricht Laufnummer 13 der Basiskonfiguration.

Tab. 5.3: Übersicht über die Simulationsergebnisse

Lauf	Konfiguration	$\dot{M}$ in 1000 kg/h	Trockner ρ_m/Verluste	Lecks	Kennlinie	Wetter	Mode 1 SF	Mode 1 Lasterf.	Mode 2 SF	Mode 2 Lasterf.
1	BK	24/ 8	0,4 /0,5	o	EK	n	0,35	1,14	0,54	0,58
2	"	"	"	"	"	s	0,40	1,37	0,84	0,92
3	"	39/13	0,246/0,5	"	"	"	0,46	1,19	0,81	0,89
4	"	"	"	"	"	n	0,37	0,96	0,48	0,51
5	"	"	1 /0,5	"	"	s	0,49	1,29	0,84	0,92
6	"	"	1 /0	"	"	"	0,67	1,29	0,99	1,12
7	"	24/ 8	0,4 /0,5	"	Feld	n	0,30	1,02	0,43	0,46
8	"	"	"	"	"	s	0,38	1,30	0,72	0,79
9	"	39/13	0,246/0,5	"	"	"	0,43	1,12	0,63	0,68
10	"	"	"	"	"	n	0,32	0,82	0,37	0,40
11	"	"	1 /0,5	"	"	s	0,47	1,24	0,72	0,79
12	"	"	1 /0	"	"	"	0,64	1,24	0,84	0,95
13	"	24 /8	0,4 /0,5	m	"	n	0,25	0,84	0,34	0,37
14	"	"	"	m+50% SPE	"	"	0,18	0,66	0,22	0,26
15	"	39/13	0,246/0,5	m	"	"	0,24	0,61	0,27	0,29
16	"	24/ 8	0,4 /0,5	"	"	s	0,28	0,95	0,57	0,62
17	"	"	"	m+50% SPE	"	"	0,22	0,82	0,37	0,45
18	"	39/13	0,246/0,5	m	"	"	0,33	0,86	0,47	0,52

LEGENDE

BK	Basiskonfiguration
EK	Einzelkollektor
m	mit Leckagen
50% SPE	50 % Leckagen beim Speicherentladen
n	normaler Wetterdatensatz
o	ohne Leckagen
s	Schönwetterdatensatz
SF	solarer Deckungsanteil

die Kennlinie (KL) des Einzelkollektors (vgl. Abb. 3.11, KL 1), für die nächsten die Feldkennlinie (vgl. Abb. 3.11, KL 2) eingegeben. Die Läufe 13 bis 15 untersuchen den Einfluß der Leckagen, wobei diese Modelle denen von 16 bis 18 entsprechen; letztere aber mit dem "Schönwetterdatensatz" rechnen. Lauf 13 repräsentiert die in Kapitel 5.2 diskutierte Basiskonfiguration. Läuft die Anlage bei schönem Wetter (L 16), d.h. die Tagessumme der Globalstrahlung beträgt mehr als 30 000 kJ/m^2, so ergibt sich im Mode 1 eine Erhöhung des solaren Deckungsanteils von 25 auf nur 28 %, da die Lastanforderungen bezüglich der Temperatur weitgehend erfüllt sind und die Werte aufgrund der Leckagen im Kollektorfeld unter 100 % bleiben. Im Mode 2 steigt der Solaranteil dagegen von 34 auf 57 %.

Da über den Einfluß von Leckagen beim Entladen des Speichers keine Messungen existieren, wurden diese im Standardlauf auch nicht berücksichtigt. Es ist jedoch bekannt, daß das Speicherdach erhebliche Undichtigkeiten aufweist; die Leckverluste betragen beim Aufladen 20 %. Die Läufe 14 und 17 zeigen, daß bei der extremen Annahme von 50 % Leckverlusten beim Entladen im ungünstigsten Fall der Deckungsanteil im Mode 1 von 25 auf 18 %, im Mode 2 von 34 auf 22 % absinkt. Da diese Betriebsart zumindest während der gesamten sonnenfreien Zeit gefahren wird, beeinflußt die Halbierung des Massenstroms den Solaranteil sowie die Lasterfüllung empfindlich. Bei dieser schlechtesten Anlagenversion wirkt sich auch die Verwendung des "Schönwetterdatensatzes" nur insofern aus, als eine Lasterfüllung von max. 45 % erreicht wird. Außerdem steigt der Bedarf an Zusatzenergie. Aufgrund des niedrigen Massenstroms entsteht im Trockner Unterdruck, und es wird Luft mit Umgebungstemperatur angesaugt, die durch die Zusatzheizung auf die Solltemperatur erwärmt werden muß. Durch das Zumischen großer Mengen von Umgebungsluft im Trockner ist eine genaue Feuchteregelung nicht möglich (vgl. Kap. 3.1.7 a)).

Der Vergleich von L 13 und L 16 mit den Läufen 15 und 18 verdeutlicht, daß im Mode 2 die Anhebung des Massendurchsatzes keine Steigerung des solaren Deckungsanteils bringt, da bei höheren Massenströmen die Kollektoraustrittstemperaturen sinken und die Leckagen größer werden.

Für die Diskussion der Läufe 1 bis 12 soll nur kurz auf die Ergebnisse im Mode 1 hingewiesen werden. Es ist festzustellen, daß beim Umschalten von einem in den anderen Betriebszustand zum Teil Schwingungen in der Regelung auftreten, die dazu führen, daß kurzzeitig vor Trocknereintritt höhere als die geforderten Temperaturen anstehen. Da in diesen Läufen alle Leckagen ausgeschaltet wurden, wird der Sollmassenstrom immer erreicht.
Die Regelung der Anlage ist vom Hersteller in Feldversuchen empirisch auf die realen Bedingungen in Salta abgestimmt und so ins Modell übernommen worden. Daher sind Oszillationen und Unzulänglichkeiten unter anderen Betriebszuständen nicht auszuschließen. Beobachtungen während der letzten Trocknungssaison Anfang 1983 bestätigen, daß auch im Normalbetrieb solche Effekte aufgetreten sind.

Lauf 7 zeigt, daß das Abdichten des Kollektorfeldes und des Speicherdachs die wirkungsvollste Maßnahme ist, um den Einfluß auf den Deckungsanteil zu vergrößern. Es wurde eine prozentuale Steigerung von 34 auf 43 % und bei der Lasterfüllung von 37 auf 46 % erzielt. Eine zusätzliche Erhöhung des Massendurchsatzes würde in diesem Fall den Solaranteil von 43 auf 37 % absinken lassen, da im dritten Trocknungsabschnitt nicht die geforderten hohen Temperaturen erbracht werden können. Je nach Wetterdatensatz treten auch hier bei identischen Modellen Änderungen im Deckungsanteil von 31 (L 7, 8) bzw. 26 % (L 9, 10) auf.

Der hypothetische Fall einer Erhöhung der Rezirkulationsrate im Trockner durch Anhebung der internen Umwälzmenge auf den in der Basisauslegung /49 / angenommenen Wert von 1 (L 11) führt - verglichen mit L 9 - zu einer Steigerung des Solar-

anteils von 63 auf 72 %. Diese Vergrößerung der im Trockner zirkulierenden Luftmenge ist jedoch praktisch nicht möglich, da dieser Luftdurchsatz den Tabak aus den Racks herausreißen würde. Ein Vergleich der Läufe 8 und 9 zeigt aber, daß auch bei Verwendung des "Schönwetterdatensatzes" eine Erhöhung des Massenstroms den solaren Anteil von 72 auf 63 % absinken läßt (vgl. L 7 und L 10), was sich dadurch erklärt, daß beim Betrieb mit hohem Durchsatz die geforderten Temperaturen in der dritten Trocknungsphase nicht erreicht werden.

Die ersten sechs Simulationen weisen analoge Ergebnisse auf; lediglich der solare Deckungsanteil, der auf die Benutzung der Kennlinie des Einzelkollektors zurückzuführen ist, liegt um durchschnittlich 13 % höher als bei L 7 bis L 12. Die Ergebnisse lassen sich allerdings auch so interpretieren, als stelle Kennlinie 2 die des realen Feldes mit der schon stark verwitterten Abdeckung dar - die Transmission beträgt nur noch 55 % - und Kennlinie 1 die eines neuen Kollektorfeldes bei gleichen Wärmeverlusten - die Kennlinien verlaufen ungefähr parallel - jedoch mit besseren optischen Eigenschaften. Das hieße, ein Auswechseln der Abdeckung würde nach Beseitigung aller Lecks im günstigsten Falle eine Steigerung des solaren Deckungsanteils von 43 auf 58 % bewirken und eine Lasterfüllung von 46 auf 54 %. Lauf 5 zeigt, daß die Erfüllung der Annahmen, wie sie für die Basisauslegung getroffen wurden, zusammen mit dem "Schönwetterdatensatz" bei einer Lasterfüllung von 92 % einen maximalen solaren Deckungsanteil von 84 % gewährleistet.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß die Anlage in Salta z.Z. mit einem solaren Deckungsanteil arbeitet, der zwischen 18 (L 14, Mode 1) und 25 % (L 13, Mode 1) liegt. Dieser Dekkungsanteil könnte jedoch allein dadurch, daß die Temperaturvorgaben geändert und ohne daß bauliche Maßnahmen erforderlich würden, auf 34 % angehoben werden. Dies wurde inzwischen durch eine Anpassung der Regelung verifiziert. Darüber hinaus würde das Abdichten von Speicher und Kollektorfeld bewirken, daß sich der Deckungsanteil auf 43 % erhöhte. Ein Austauschen der Abdekkung, die den Erfordernissen nur noch in unzureichendem Maße gerecht wird, sollte in Erwägung gezogen werden und hätte

zur Folge, daß der Deckungsanteil auf 54 % gesteigert werden könnte. Eine Erhöhung des Massendurchsatzes würde allerdings für den Gesamtprozeß keine Verbesserung bedeuten, wenn das Lastprofil (Standardtrocknungskurve) beibehalten wird.

Abbildung 5.5 veranschaulicht die Ergebnisse noch einmal. Es ist zu erkennen, daß bei L 14, Mode 1, - die Speicherverluste beim Entladen werden berücksichtigt - die aufzuwendende Gesamtenergie verglichen mit anderen Läufen beträchtlich größer ist, da im Trockner aufgrund des geringen Massenstroms Unterdruck herrscht und Luft mit Umgebungstemperatur angesaugt wird, die zusätzlich erwärmt werden muß. Die Ergebnisse der Rechenläufe 14, Mode 1, L 7, Mode 2, L 1, Mode 2 und L 5, Mode 2, sind analog zu den Tabellen 5.1 und 5.2 im Anhang 8 wiedergegeben.

5.4 Auswirkung der Speicherkapazität auf den solaren Deckungsanteil

Der in dieser Trocknungsanlage eingesetzte Kiesbettspeicher ist ein Kurzzeitspeicher, d.h. er soll in der Tageszeit, in der die Sonnenstrahlung für den Betrieb des Kollektorfeldes nicht ausreicht, genügend Warmluft für die Trocknung liefern, und ist nicht für die Überbrückung längerer Schlechtwetterperioden konzipiert. Der typische Auslegungsparameter für den Speicher ist die Speicherkapazität, bei der das Speichervolumen auf die Kollektorfläche bezogen wird. Typische Werte für Luftsysteme liegen zwischen 0,15 und 0,35 m^3/m^2. /62/
Das Speichervolumen der Salta-Anlage ist mit 124 m^3 anzusetzen und ergibt bei einer Kollektorfläche von 737 m^2 eine Speicherkapazität von 0,168 m^3/m^2. Abbildung 5.6 (S. 113) zeigt den Einfluß der Kapazität auf den solaren Deckungsanteil, wobei diesem Lauf die gleichen Daten zugrunde liegen wie in L 13. Nur das Speichervolumen wurde unter Beibehaltung des Verhältnisses Grundfläche/Höhe von 47 m^2/m in der Weise variiert, daß die Speicherkapazitäten Werte zwischen 0,1 und 1 annahmen.

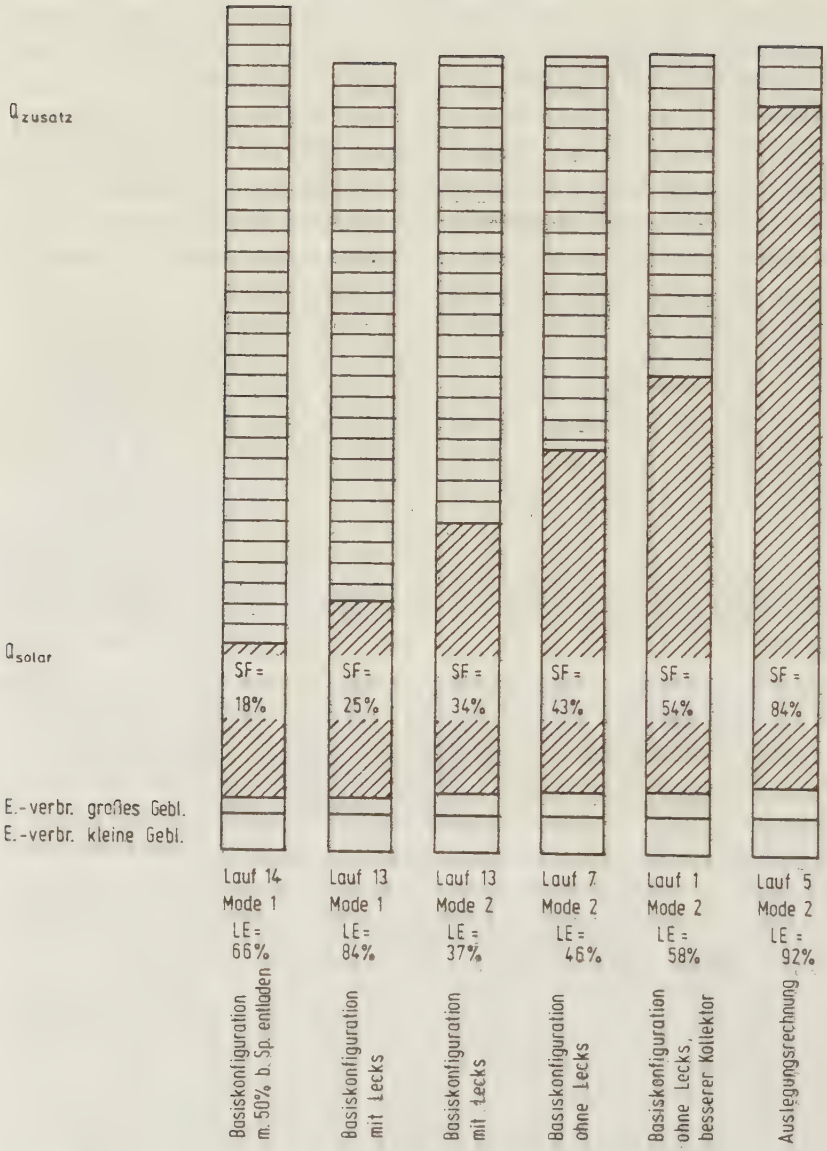


Abb. 5.5: Auswirkungen von Modifikationen der Basiskonfiguration auf den solaren Deckungsanteil (SF)

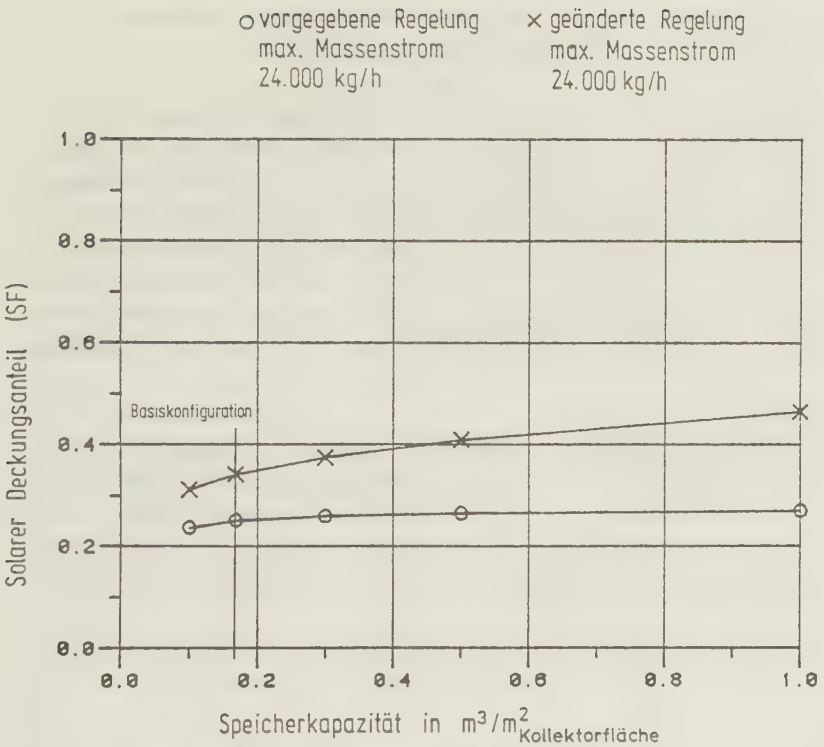


Abb. 5.6: Einfluß der Speicherkapazität auf den solaren Deckungsanteil

Die Ergebnisse der Läufe im Mode 1 belegen, daß aufgrund der vorgegebenen Regelung nur mit einem solaren Deckungsanteil von 23 bis max. 27 % zu rechnen ist. Bei geänderter Regelung, Mode 2, liegt der Deckungsanteil im Bereich von 31 bis 46 %. Dies bedeutet, daß selbst eine Verzehnfachung des Speichervolumens nur eine absolute Steigerung des Solaranteils um 15 % mit sich bringen würde. Die Erhöhung kommt dadurch zustande, daß bei ähnlichen Speicherprofilen zu Beginn der Rechenläufe die Systeme mit größer werdendem Speicher mehr Energie bereitstellen können. Somit erweisen sich die für diese Anlage festgelegten Auslegungsparameter als gut.

5.5 Auswirkung der Anlagenvergrößerung bzw. -verkleinerung auf den solaren Deckungsanteil

In diesem Kapitel wird unter Zugrundelegung der Basiskonfiguration, L 13, untersucht, wie sich Änderungen der Kollektorfläche und des Speichervolumens auf den solaren Deckungsanteil auswirken. Ausgehend davon, daß das Verhältnis Speichervolumen/Kollektorfläche entsprechend dem Auslegungswert von 0,168 m^3/m^2 konstant gehalten wird, wurde die Kollektorfläche von 500 auf max. 1500 m^2 vergrößert und demgemäß auch das Speichervolumen erhöht. Abbildung 5.7 zeigt den Einfluß

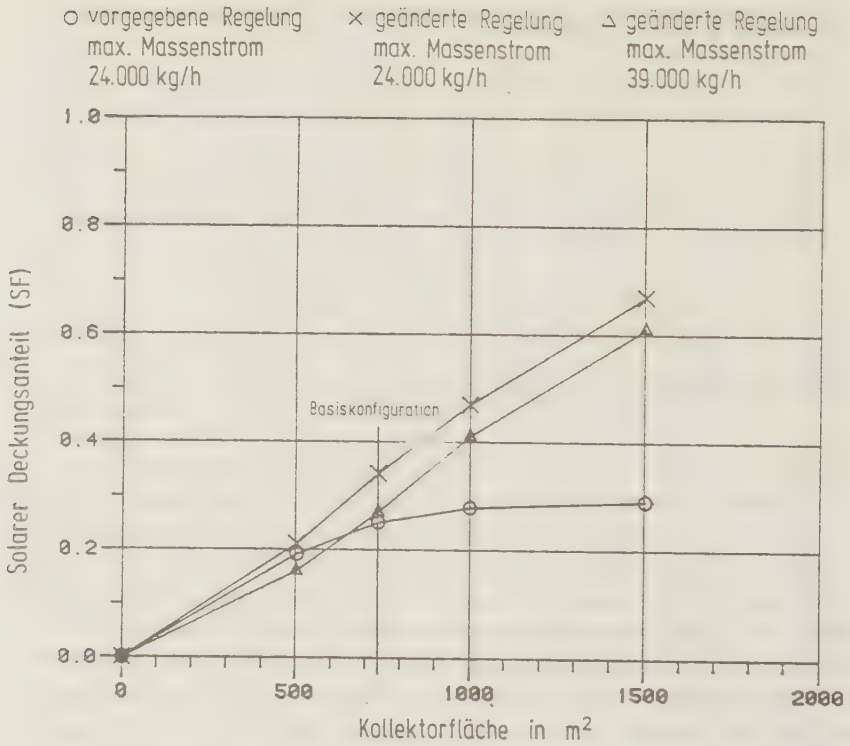


Abb. 5.7: Einfluß der Anlagenvergrößerung auf den solaren Deckungsanteil

auf den solaren Deckungsanteil bei drei verschiedenen Betriebsmodi. Im Mode 1 steigt wegen der unzureichenden Temperaturvorgabe der Deckungsanteil nicht über 29 %. Beim Betrieb im Mode 2 ist ein praktisch linearer Anstieg des Deckungsanteils im betrachteten Bereich auf 67 % zu erkennen. Arbeitet die Anlage dagegen im Mode 2 mit erhöhten Massenströmen, L 15, so tritt das schon beschriebene Phänomen auf, daß sich unter sonst gleichen Bedingungen der Deckungsanteil verringert, so daß der Maximalwert nur 61 % beträgt.
Der lineare Anstieg stellt eine obere Grenze dar. Für Kollektorfeldgrößen oberhalb der Basiskonfiguration flacht die reale Kurve ab, was darauf zurückzuführen ist, daß die zugrunde gelegten Kennlinien (vgl. Abb. 3.11) bei kleiner werdenden flächenbezogenen Massenströmen nicht mehr gelten. Aufgrund der hohen Temperaturen steigen die Kollektorverluste an, und der Kollektorwirkungsgrad fällt ab.
Abschließend läßt sich feststellen, daß auch in diesem Fall der Auslegungswert für die Kollektorfläche sinnvoll gewählt ist.

5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

In diesem Kapitel wurde nachgewiesen, daß die Anlagenkonfiguration aufgrund der ursprünglichen Auslegungswerte einen maximalen Deckungsanteil von 84 % erbringen kann. Dieser theoretisch gute Wert wird jedoch in der Praxis nicht bestätigt. Hier beträgt der Deckungsanteil zwischen 18 und 25 %. Zusätzlich muß berücksichtigt werden, daß in der Auslegung von einer Rezirkulationsrate von E i n s ausgegangen wurde, da über sie zum damaligen Zeitpunkt keinerlei Daten vorlagen. Neuere Messungen zeigen nun, daß dieser Wert viel niedriger anzusetzen ist, nämlich mit 0,2 bis 0,4. Letztlich ausschlaggebend für den geringen solaren Deckungsanteil sind jedoch die Lekkagen in Kollektorfeld und Speicher sowie die falsche Tempe-

raturvorgabe an die Regelung. Daß das Erfassen des Einflusses von Leckverlusten in Luftsystemen nicht trivial ist, belegt folgendes Zitat von DUFFIE und BECKMAN /62/, S. 367:

> "The extent to which simulations represent the operation of real physical systems depends on the level of detail included in the numerical experiment. Component models can vary in complexity, as can systems. However, there may be factors in system operation which are difficult to simulate, such as leaks in air systems, and operation of real systems may be less ideal than the simulation indicates."

Um eine wirksame Verbesserung des Anlagenverhaltens zu erreichen, dürfte der einfachste Weg die Änderung der Vorgabetemperaturen sein. Als weitere Maßnahmen sollten das Abdichten des Systems sowie der Austausch der Abdeckung folgen, um zu einem besseren Wirkungsgrad zu gelangen (vgl. Abb. 5.5). Die Erhöhung des Massenstroms zeigt zwar keinen positiven Einfluß auf den solaren Deckungsanteil, es ist allerdings denkbar, daß ein Niedrigtemperaturtrocknungszyklus bei einem gleichzeitig größeren solaren Deckungsanteil bessere Trocknungsergebnisse erzielen würde. Dies läßt sich jedoch aufgrund mangelnder Informationen über den Wärme- und Stoffübergang im dichtgepackten Tabakbündel zur Zeit nicht simulieren.

6. Wirtschaftlichkeitsanalyse

6.1 Bestimmung der Vorgaben

Die technischen Möglichkeiten der Solarenergienutzung auf den unterschiedlichsten Anwendungsgebieten sind inzwischen allgemein anerkannt. Obwohl die Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen zum Teil umstritten ist, gibt es zweifellos Einsatzbereiche, in denen solarbetriebene Installationen durchaus mit konventionell betriebenen konkurrieren können. Als ein Beispiel hierfür sei auf die Verwendung von Thermosiphon-Systemen zur Brauchwassererwärmung in südlichen Ländern verwiesen.

Inwieweit das in den vorherigen Kapiteln beschriebene System wirtschaftlich arbeiten kann, soll im folgenden untersucht werden. Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen beschränken sich auf eine rein mikro-ökonomische Betrachtungsweise, volkswirtschaftliche Auswirkungen des Einsatzes von Solarenergie, die ausführlich von BOSSEL et al. /63/ und MÜLLER-REISSMANN und BOSSEL /64/ behandelt werden, können im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden.

Solarsysteme sind allgemein charakterisiert durch hohe Investitions- und niedrige Betriebskosten, so daß das Hauptproblem bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung der Vergleich der bekannten Anfangsinvestition mit den geschätzten zukünftigen Betriebskosten darstellt. Die meisten Solarsysteme benötigen eine konventionelle Zusatzheizung, so daß die ganzjährige Lastverteilung anteilig getragen wird. Übertragen auf die in Salta errichtete Anlage bedeutet dies, daß untersucht werden soll, wie sich die Energieeinsparungen und Betriebskosten zur Anfangsinvestition verhalten, oder anders ausgedrückt, unter welchen Bedingungen und in welcher Zeit sich eine solche Anlage amortisiert. Es soll der Fragestellung nachgegangen werden, unter welchen Randbedingungen sich das vorgegebene Luftkollektor-Speicher-System bei Zugrundelegung drei verschiedener Betriebsarten mit unterschiedlichen solaren Deckungsanteilen rentiert.

6.2 Methode der Kostenrechnung

Die in dieser Arbeit benutzte Methode wurde von BRANDEMUEHL und BECKMAN /36/ sowie DUFFIE und BECKMAN /62/ publiziert und von FREEMAN /28/, der im Auftrage der International Energy Agency (IEA) eine Untersuchung über die Optimierung von Solaranlagen durchführte, nach einem Vergleich mit anderen Verfahren ebenfalls empfohlen. Das Rechenschema dieser Methode wird im folgenden kurz skizziert.

Bestimmt werden sollen die finanziellen Einsparungen, die durch den Betrieb der Anlage während ihrer gesamten Lebensdauer gegenüber einem konventionellen System erzielt werden. Diese Lebenszeiteinsparungen (Life Cycle Savings, LCS) lassen sich wie folgt beschreiben*):

$$LCS = P_1 \cdot C_{Fl} \cdot Q_{Load} \cdot SF - P_2 \cdot (C_A \cdot A + C_E) \qquad (6.1)$$

mit

LCS	Lebenszeiteinsparungen des solaren Heizsystems gegenüber einem konventionellen System
C_{Fl}	Spezifischer Ölpreis für die konventionelle Heizung
Q_{Load}	Gesamter Energieverbrauch in einem Jahr
SF	Solarer Deckungsanteil
C_A	Flächenabhängige Kosten
C_E	Flächenunabhängige Kosten

P_1 gibt hierbei das Verhältnis der Lebenszeitöleinsparungen zu den Öleinsparungen im ersten Jahr und P_2 das Verhältnis der Lebenszeitausgaben zu der Gesamtinvestition an. Alle Kosten, die proportional den Ölkosten des ersten Jahres sind, können durch geeignete Festlegung von P_1 eingeschlossen werden, und alle Kosten, die proportional der Investition sind, können durch P_2 berücksichtigt werden.

---

* Für die Terme in den Formeln wird die gängige englische Nomenklatur benutzt.

Die Gleichung für P_1 lautet:

$$P_1 = (1 - TQ) \cdot PWF\ (N_E, i_f, d) \qquad (6.2)$$

Es gilt: i_f Inflationsrate für Heizöl (fuel)
TQ Effektiver Einkommenssteuersatz
N_E Dauer der Wirtschaftlichkeitsberechnung
d Diskontsatz

Die Funktion PWF (Present Worth Factor), Barwertfaktor, ist definiert als:

$$PWF\ (N,i,d) = \frac{1}{d - i}\left[1 - \left(\frac{1 + i}{1 + d}\right)^N\right] \qquad (6.3)$$

Mit ihr läßt sich der Wert einer periodisch auftretenden Reihe von N Zahlungen in gleicher Höhe mit dem Zinssatz d und der Inflationsrate i erfassen.

P_2 wird nach folgender Formel bestimmt:

$$\begin{aligned}
&① \quad P_2 = D + \\
&② \quad + (1 - D) \cdot \frac{PWF\ (N_{min},0,d)}{PWF\ (N_L,0,m)} - \\
&③ \quad - (1 - D) \cdot TQ \cdot \left[PWF(N_{min},m,d) \cdot \left(m - \frac{1}{PWF\ (N_L,0,m)}\right) + \right. \\
&\qquad \left. + \frac{PWF\ (N_{min},0,d)}{PWF\ (N_L,0,m)}\right] + \\
&④ \quad + (1 - TQ) \cdot M_S \cdot PWF\ (N_E,i_g,d) + \\
&⑤ \quad + T\ (1 - TQ) \cdot V \cdot PWF\ (N_E,i_g,d) - \\
&⑥ \quad - \frac{TQ}{N_D} \cdot PWF\ (N_{min},0,d) - \\
&⑦ \quad - \frac{SAL}{(1 + d)^{N_E}}
\end{aligned} \qquad (6.4)$$

Folgende Parameter treten auf:

D	Verhältnis der Tilgungsrate des Kredites zur Gesamtinvestition
N_{min}	Anzahl der Jahre, während der die Tilgungsrate für das Darlehen in der Wirtschaftlichkeitsrechnung berücksichtigt wird (Minimum von N_E und N_L)
N_L	Laufzeit des Darlehens
m	Darlehnszinsen
M_S	Verhältnis der vermischten Kosten des ersten Jahres zur Gesamtinvestition
i_g	Allgemeine Inflationsrate
T	Vermögenssteuersatz, basierend auf dem geschätzten Wert
V	Verhältnis des geschätzten Wertes des solaren Systems im ersten Jahr zur Gesamtinvestition
N_E	Dauer der Wirtschaftlichkeitsrechnung
SAL	Verhältnis des Wiederverkaufswertes am Ende des Berechnungszeitraums zur Gesamtinvestition

In dieser Gleichung für P_2 steht der (1.) Term auf der rechten Seite für die Tilgungsrate, der (2.) für die Lebenszeitkosten von Darlehen und Zinsen, der (3.) für die Einkommenssteuerreduzierung durch die Zinszahlungen, der (4.) für die vermischten Kosten, der (5.) für die Nettovermögenssteuer (bezahlte Steuern minus erspartem Einkommen), der (6.) für Steuereinsparungen durch Abschreibung und der (7.) für den Gegenwartswert des Wiederverkaufswertes am Ende des Berechnungszeitraumes. Entsprechend den jeweiligen Erfordernissen können diese Terme hinzugefügt oder weggelassen werden.
Die Gleichungen für P_1 und P_2 enthalten weder die Kollektorfläche A noch den solaren Deckungsanteil SF, sondern nur Gegenwartsfaktoren und Verhältnisse von Zahlungen zur Gesamtinvestition.

Es wird davon ausgegangen, daß der solare Anlagenteil als Erweiterung eines vorhandenen konventionellen, d.h. mit Heizöl betriebenen Systems dienen soll, so daß für das Energieverteilungssystem, das bei beiden Anlagen gleich ist, auf einen

Kostenvergleich verzichtet werden kann. Selbst wenn die gesamte Anlage neu erstellt würde, könnten die Anlagenkosten für den konventionellen Teil unberücksichtigt bleiben, da dieser auf jeden Fall benötigt wird, und zwar entweder zum Bereitstellen der gesamten Energie (bei konventionellem Betrieb) oder aber als Reserve für sonnenscheinarme Perioden.

Folgende Kosten müssen also für den Vergleich herangezogen werden: auf der einen Seite die Brennstoffkosten der konventionellen Anlage und auf der anderen die Investititons- und Betriebskosten der Solaranlage. Die Investitionskosten C_S werden unterteilt in Kosten C_A, die proportional der Kollektorfläche sind, und Kosten C_E, die sich von der Kollektorfläche unabhängig ergeben (Regelungseinrichtungen, Rohrleitungen etc.). Diese Unterteilung ist sinnvoll, da die Leistung der Anlage hauptsächlich eine Funktion der Kollektorfläche ist. Für die gesamten Investitionskosten ergibt sich

$$C_S = C_A \cdot A + C_E \qquad (6.5)$$

Die Betriebskosten enthalten die Kosten für Heizöl, das benötigt wird, um sonnenscheinarme Perioden zu überbrücken, die Kosten der Energie, die zum Betrieb der erforderlichen Gebläse gebraucht wird - im folgenden kurz Hilfsenergie genannt -, die Kosten für zusätzliche Versicherungen für die Solaranlage, für Wartung und Instandhaltung sowie die laufenden Zinsen für das Kapital, das zum Erwerb der Solaranlage aufgenommen wurde. Steuerliche Vor- oder Nachteile, die mit dem Erwerb und Betrieb der Solaranlage verbunden sind, hängen von den jeweiligen Gegebenheiten des Landes ab und sind nur schwer in einen allgemeinen Berechnungsformalismus einzubeziehen. In vielen Fällen geben sie jedoch den Ausschlag für den Erwerb oder Nichterwerb einer Solaranlage.

Das Berechnungsverfahren nach der P_1-/P_2-Methode ist als Komponente in der TRNSYS-Bibliothek enthalten. Um jedoch die Kostenrechnung von der Benutzung des Simulators unabhängig zu machen, wurde diese Komponente separat in ein Dialogsystem implementiert.

6.3 Kostenstruktur des Systems

Das dargestellte Verfahren wird zur Untersuchung der Wirtschaftlichkeit der Salta-Anlage benutzt. Aufgrund der besonderen Verhältnisse in Argentinien, die präzise Aussagen über die Entwicklung ökonomischer Parameter, wie Zinsen und Inflationsraten, unmöglich machen, werden die Berechnungen nicht in Pesos, sondern in Dollar durchgeführt. Die Angaben zur Bestimmung der Anlagenkosten stammen von der Herstellerfirma; für die Umrechnung von Deutscher Mark in US $ wurde von einem Wechselkurs von 2,50 DM/US $ ausgegangen.

Da bei der Solaranlage die Kollektoren den größten Kostenfaktor darstellen, wurde parallel zu dieser Arbeit ein Selbstbausystem für Luftkollektoren entwickelt, die die gleichen thermischen und optischen Eigenschaften besitzen wie die in Argentinien eingesetzten Kollektoren, jedoch wesentlich kostengünstiger liegen. Die Ausgaben belaufen sich etwa auf die Hälfte der Kosten, die für die in Salta benutzten Kollektoren aufgewendet wurden. Tabelle 6.1 enthält eine Aufstellung der Anlagenkosten des argentinischen Systems sowie der Selbstbaukollektoren.
Möglicherweise könnte auch durch rationelle Massenfertigung von Kollektoren eine Senkung der flächenabhängigen Kosten erzielt werden.

Das Solarsystem wurde primär zur Substitution von Heizöl bei der Tabaktrocknung errichtet. Da die Betriebskosten abhängig sind vom Grad der Nutzung der Anlage, der Tabak jedoch jährlich nur in der vier Monate dauernden Ernteperiode getrocknet werden kann, ist geplant, während weiterer zwei Monate Paprika und andere landwirtschaftliche Produkte zu trocknen und in den restlichen sechs Monaten ein Gewächshaus zu beheizen.

Die Tabaktrocknung verläuft - wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben - in einwöchigen Trockenzyklen, wobei an fünf Tagen getrocknet wird und zwei Tage zum Be- und Entladen der Trockenkammer benötigt werden. Pro Zyklus werden 10 t grüner Tabak

Tab. 6.1: Kostenstruktur des Solarsystems

	Anlagenkosten	
	reale Anlage	bei Selbstbau der Kollektoren
Kollektoren (737 m^2)	165 825,-- DM	80 000,-- DM
Rohre und Konsolen	20 000,-- DM	20 000,-- DM
Ventilatoren und Klappen	15 000,-- DM	15 000,-- DM
	200 825,-- DM	115 000,-- DM
Montage (1,5 Arbeitsstunden pro m^2 bei 30 DM/h bzw. 12,50 DM/h bei Selbstbau der Kollektoren)	33 165,-- DM	14 000,-- DM
	233 990,-- DM	129 000,-- DM
⇨ Kosten pro m^2	317,-- DM	175,-- DM
1 US $ = 2,50 DM	126,80 US $	70,-- US $
Kosten für Speicher:		
Speichervolumen (166 m^3)	17 100,-- US $	
Kosten pro m^2 Kollektorfläche	23,20 US $	23,20 US $
⇨ gesamte flächenabhängige Kosten	150,-- US $/$m^2$	93,-- US $/$m^2$
Flächenunabhängige Kosten:		
Regelung	7 000,-- DM	
Schaltschrank	3 500,-- DM	
Montage (200 h à 40 DM/h)	8 000,-- DM	
Verkabelung (320 h à 30 DM/h)	9 600,-- DM	
fixe Kosten	28 100,-- DM = 11 240,-- US $	
⇨ Gesamtanlagenkosten	121 790,-- US $	79 781,-- US $

zu 1 t Rohtabak getrocknet. Bei konventioneller Trocknung bedeutet dies einen Heizölverbrauch von ca. 1000 l. Das entspricht bei einem Ölpreis von 0,70 DM/l ohne MwSt. Kosten in Höhe von 700 DM bzw. 280 US $ pro Zyklus. Es wird angenommen, daß die Trocknung von Paprika oder anderer landwirtschaftlicher Güter eine ähnliche Energiebedarfsstruktur aufweist.

Bei der Nutzung der Solaranlage werden zum Betrieb der Gebläse entsprechend L 5, Mode 2, ca. 900 kWh elektrischer Energie verbraucht, so daß sich die Kosten bei einem Strompreis von 0,15 DM/kWh auf 135 DM bzw. 54 US $ belaufen. Je nach solarem Deckungsanteil müssen zusätzlich Heizölkosten zur Überbrückung sonnenscheinarmer Perioden hinzugerechnet werden.

Für das Gewächshaus läßt sich der Wärmebedarf wie folgt abschätzen. Den Berechnungen liegt ein einfachverglastes Warmgewächshaus nach DIN 11 536 zugrunde.

Abmessungen	A	$= 12{,}4\ m \cdot 13\ m = 161{,}2\ m^2$
mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient	k	$= 15{,}75\ W/(m^2K)$

Im Winterhalbjahr gelten folgende Wetterdaten:

Tagesmitteltemperatur	T_m	$= 8^\circ C$
Mindesttemperatur im Gewächshaus	T_{min}	$= 18^\circ C$

Daraus ergibt sich eine mittlere Temperaturdifferenz von $\Delta T_m = 10^\circ C$.

Der spezifische Wärmebedarf ist dann

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T = 25{,}4\ kW$$

und beträgt 109 728 kWh/Halbjahr. Das entspricht - unter Berücksichtigung des unteren Heizwertes $H_u = 9{,}96$ kWh/l und eines mittleren Anlagenwirkungsgrades von $\eta = 0{,}72$ (lt. VDI-Richtlinie 2067, Blatt 1) - einem Heizölbedarf bei konventionellem Betrieb von 15 300 l und Kosten in Höhe von 10 710 DM bzw. 4285 US $ pro Halbjahr.

Für die Gebläse werden beim Betrieb des Gewächshauses folgende Annahmen getroffen: Das große Gebläse (15 kW) zum Laden des Speichers läuft täglich vier Stunden, entsprechend 28 Stunden pro Woche, und die kleinen Gebläse (5 kW) sind sechzehn Stunden pro Tag in Betrieb, entsprechend 112 Stunden pro Woche, da tagsüber das Gewächshaus von der Sonne direkt erwärmt wird. Es ergibt sich ein Strombedarf von 980 kWh pro Woche bzw. 25 480 kWh im halben Jahr, so daß sich die Kosten bei einem Strompreis von 0,15 DM/kWh auf 3822 DM bzw. 1529 US $ belaufen.

Weiterhin ist für die Betriebskosten der Solaranlage der solare Deckungsanteil (SF) bestimmend. Da dieser weder für das Gewächshaus noch für die Trocknungsanlage genau vorausgesagt werden kann, wurden für die Wirtschaftlichkeitsrechnung folgende optimistische Annahmen getroffen:

- 4 Monate Tabaktrocknung mit Deckungsanteilen von 60 % und 80 %
- 4 Monate Tabaktrocknung und zusätzlich 2 Monate Trocknung anderer Güter ebenfalls mit Deckungsanteilen von 60 % und 80 %
- 6 Monate Trocknung und 6 Monate Gewächshausheizung mit Deckungsanteilen von 60 % und 80 % und zusätzlich bei einem Deckungsanteil von 80 % für die Trocknung Deckungsanteile von 90 % und 100 % für das Gewächshaus

Die sich ergebenden Betriebskosten sind in Tabelle 6.2 zunächst getrennt für Trocknung und Gewächshaus und dann zusammengefaßt aufgeführt.

Neben den beschriebenen anlagenspezifischen Werten gehen Werte der ökonomischen Parameter in die Wirtschaftlichkeitsberechnung ein:

Tab. 6.2: Zusammenstellung der Betriebskosten in US $

T r o c k n u n g

Trocknungsdauer	4 Monate (17 Wo.)		6 Monate (26 Wo.)	
Deckungsanteil (SF)	60 %	80 %	60 %	80 %
Kosten bei Solarbetrieb				
Heizöl	1 904	952	2 912	1 456
Stromkosten	918	918	1 404	1 404
Summe	2 822	1 870	4 316	2 860
Kosten bei konventionellem Betrieb	4 760		7 280	

G e w ä c h s h a u s

Heizperiode	6 Monate (26 Wo.)			
Deckungsanteil (SF)	60 %	80 %	90 %	100 %
Kosten bei Solarbetrieb	3 243	2 386	1 958	1 529
Kosten bei konventionellem Betrieb	4 285			

G e s a m t k o s t e n (Trocknung und Gewächshausheizung)

Nutzungsdauer	4 Monate (17 Wo.)		6 Monate (26 Wo.)		12 Monate (52 Wo.)			
Deckungsanteil (SF)	60 %	80 %	60 %	80 %	60% + 60%	80% + 80%	80% + 90%	80% + 100%
Kosten bei Solarbetrieb	2 822	1 870	4 316	2 860	7 559	5 246	4 818	4 389
Kosten bei konventionellem Betrieb	4 760		7 280		11 565			

- Der Zeitraum der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung wird entsprechend der wahrscheinlichen Lebensdauer der Anlage mit 15 Jahren angesetzt.
- Die Anlage wird vollständig fremdfinanziert, d.h. der Eigenkapitalanteil wird mit 0 % eingesetzt.
- Der Zinssatz des Darlehens beträgt 8 %.
- Die Laufzeit des Darlehens entspricht der Lebensdauer der Anlage und wird mit 15 Jahren angenommen.
- Der Diskontsatz beträgt 8 %.
- Der effektive Einkommensteuersatz wird mit 50 % angesetzt.
- Vermögenssteuer bleibt unberücksichtigt; infolgedessen ist auch eine Schätzung des Wertes der Anlage im ersten Jahr überflüssig.
- Versicherung und Wartungskosten betragen 1 % der Investition.
- Ein Wiederverkaufswert ist nicht gegeben.
- Die Anlage wird kommerziell genutzt und über 10 Jahre abgeschrieben.

Die allgemeine Inflationsrate und die für Heizöl werden ebenso wie die flächenabhängigen Kosten und der solare Deckungsanteil in verschiedenen Rechnungsdurchgängen variiert, da sie nicht sicher zu bestimmen sind und das Ergebnis stark beeinflussen. Für die Inflationsraten werden stufenweise Werte zwischen 5 und 15 bzw. 25 % angesetzt.

6.4 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Ergebnisse von 160 Rechenläufen sind in Tabelle 6.3 zusammengefaßt. Bei eingehender Betrachtung fällt auf, daß sich die entsprechenden Werte für C_A = 93 US $ nur um Konstanten unterscheiden, und zwar für i_g = 5 % um 20 067,53 US $, für

Tab. 6.3: Einsparungen durch Sonnenenergie bei 15jähriger Nutzungsdauer (Life Cycle Savings, LCS)

I. Flächenabhängige Kosten 150,0 US $/m^2

Nutzungsdauer			4 Monate		6 Monate		12 Monate			
Deckungsanteil (SF)			60 %	80 %	60 %	80 %	60 % + 60 %	80 % + 80 %	80 % + 90 %	80 % + 100 %
Inflationsraten in %	i_g	i_{fuel}	Einsparungen in US $							
	5	5	- 47 046,83	- 41 578,60	- 41 153,55	- 32 790,38	- 35 168,37	- 21 882,65	- 19 424,25	- 16 960,10
	5	10	- 42 827,59	- 35 286,75	- 34 700,59	- 23 167,55	- 26 446,87	- 8 125,49	- 4 735,20	- 1 337,15
	5	15	- 36 512,56	- 25 869,61	- 25 042,32	- 8 764,86	- 13 393,20	12 465,15	17 250,00	22 046,04
	10	10	- 45 479,09	- 37 938,26	- 37 352,10	- 25 819,06	- 29 098,37	- 10 777,00	- 7 386,79	- 3 908,66
	10	15	- 39 164,07	- 28 521,12	- 27 693,83	- 11 416,37	- 16 044,71	9 813,64	14 598,49	19 394,53
	10	20	- 29 685,30	- 14 386,11	- 13 196,89	10 201,87	3 548,65	40 719,89	47 598,09	54 492,38
	15	15	- 43 132,63	- 32 489,68	- 31 662,39	- 15 384,93	- 20 013,27	5 845,00	10 629,93	15 425,97
	15	20	- 33 653,87	- 18 [illegible],68	- 17 165,45	6 233,30	419,91	36 751,33	43 629,53	50 523,81
	15	25	- 19 428,32	2 858,85	4 591,26	38 677,53	28 985,41	83 134,83	93 154,69	103 197,97

II. Flächenabhängige Kosten 93,0 US $/m^2

Inflationsraten in %	5	5	- 26 979,30	- 21 511,08	- 21 086,03	- 12 722,86	- 15 100,85	- 1 815,13	643,28	3 107,43
	5	10	- 22 760,06	- 15 219,23	- 14 633,07	- 3 100,03	- 6 379,34	11 942,04	15 332,24	18 730,37
	5	15	- 16 445,04	- 5 802,08	- 4 974,80	11 302,66	6 674,32	32 532,67	37 317,52	42 113,56
	5	20	- 6 966,27	8 332,92	9 522,14	32 920,90	26 267,68	63 438,93	70 317,13	77 211,41
	5	25	7 259,27	29 546,53	31 278,85	65 365,13	55 673,01	109 822,42	119 842,28	129 885,56
	10	10	- 24 496,99	- 16 956,15	- 16 370,00	- 4 836,95	- 8 116,27	10 205,11	13 595,32	16 993,45
	10	15	- 18 181,96	- 7 539,01	- 6 711,72	9 565,73	4 937,39	30 795,75	35 580,60	40 376,64
	10	20	- 8 703,20	6 595,99	7 785,21	31 183,97	24 530,75	61 702,00	68 580,20	75 474,48
	15	15	- 20 781,65	- 10 138,69	- 9 311,41	6 966,05	2 337,71	28 196,06	32 980,91	37 776,95
	15	20	- 11 302,88	3 996,31	'5 185,53	28 584,29	21 931,07	59 102,31	65 980,52	72 874,80
	15	25	2 922,66	25 209,84	26 942,24	61 028,52	51 336,40	105 485,81	115 505,67	125 548,95

i_g = 10 % um 20 982,11 US $ und für i_g = 15 % um 22 350,98 US $. Daß diese Werte Konstanten sein müssen, läßt sich wie folgt nachweisen. Gleichung (6.1) zur Bestimmung der Einsparungen durch Nutzung der Sonnenenergie (Life Cycle Savings) lautet:

$$LCS = P_1 \cdot C_{Fl} \cdot Q_{Load} - P_2 \cdot (C_A \cdot A + C_E)$$

Es muß also gelten:

$$LCS\ (C_{A1}) + K_1 \stackrel{!}{=} LCS\ (C_{A2}) \qquad (6.6)$$

$$P_1 \cdot C_{Fl} \cdot Q_{Load} - P_2 \cdot (C_{A1} \cdot A + C_E) + K_1 =$$

$$= P_1 \cdot C_{Fl} \cdot Q_{Load} - P_2 \cdot (C_{A2} \cdot A + C_E) \qquad (6.7)$$

$$K_1 = P_2 \cdot A \cdot (C_{A2} - C_{A1}) \qquad (6.8)$$

Weiterhin zeigt sich, daß sich die entsprechenden Werte für i_g = 5 %, i_g = 10 % und für i_g = 15 % bei konstantem i_{fuel} ebenfalls nur um feste Werte unterscheiden. Diese betragen bei C_A = 93 US $ zwischen i_g = 5 % und i_g = 10 % 1736,93 US $, zwischen i_g = 5 % und i_g = 15 % 4336,62 US $ und zwischen i_g = 10 % und i_g = 15 % 2599,69 US $. Die Verringerung der Life-Cycle-Savings bei steigender Inflationsrate beruht auf einem Ansteigen der Mischkosten (Versicherung, Wartung etc.), vgl. Gleichung (6.4), ④ Term.

Der Beweis lautet wie folgt:

$$LCS\ (i_{g1}) + K_2 \stackrel{!}{=} LCS\ (i_{g2}) \qquad (6.9)$$

$$P_1 \cdot C_{Fl} \cdot Q_{Load} - P_2\ (i_{g1}) \cdot (C_A \cdot A + C_E) + K_2 =$$

$$= P_1 \cdot C_{Fl} \cdot Q_{Load} - P_2\ (i_{g2}) \cdot (C_A \cdot A + C_E) \qquad (6.10)$$

$$K_2 = (C_A \cdot A + C_E) \cdot (P_2\ (i_{g1}) - P_2\ (i_{g2})) \qquad (6.11)$$

Durch Ausnutzung dieser Konstanten läßt sich die Menge der graphisch darzustellenden Werte erheblich reduzieren. Alle in Abbildung 6.1 gezeichneten Kurven werden durch den Kurvenzug A - B repräsentiert.

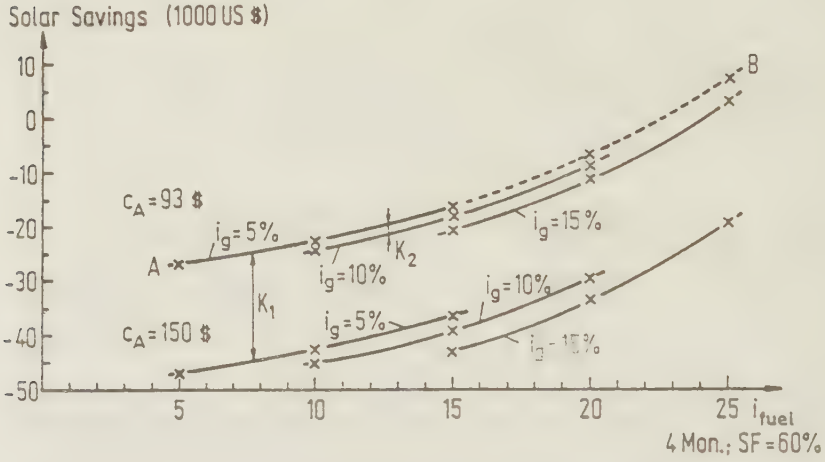


Abb. 6.1: Graphische Datenkompression unter Benutzung der Konstanten K_1 und K_2

In Abbildung 6.2, die für alle Werte aus Tabelle 6.3 Gültigkeit besitzt, werden nur die Werte für C_A = 93 US $ und i_g = 5 % dargestellt, wobei mit Hilfe der Konstanten weitere Werte für i_{fuel} = 20 % und i_{fuel} = 25 % berechnet wurden. Da die Differenz zu den Werten für C_A = 150 US $ bei i_g = 5 % fast genau 20 000 US $ beträgt, lassen sich durch doppelte Skalierung der Ordinate die Werte für C_A = 93 US $ und C_A = 150 US $ in einem einzigen Diagramm veranschaulichen.

Um den Verlauf der Kurven deutlich zu zeigen, sollen beispielhaft für eine Kurve weitere Werte berechnet werden. Es gelten C_A = 93 US $, 12 Monate Nutzungsdauer, solarer Deckungsanteil 80 % und eine allgemeine Inflationsrate von 5 %. Bei einer Variation der Inflationsrate für Heizöl (i_{fuel}) ergeben sich folgende Einsparungen (vgl. Abb. 6.2):

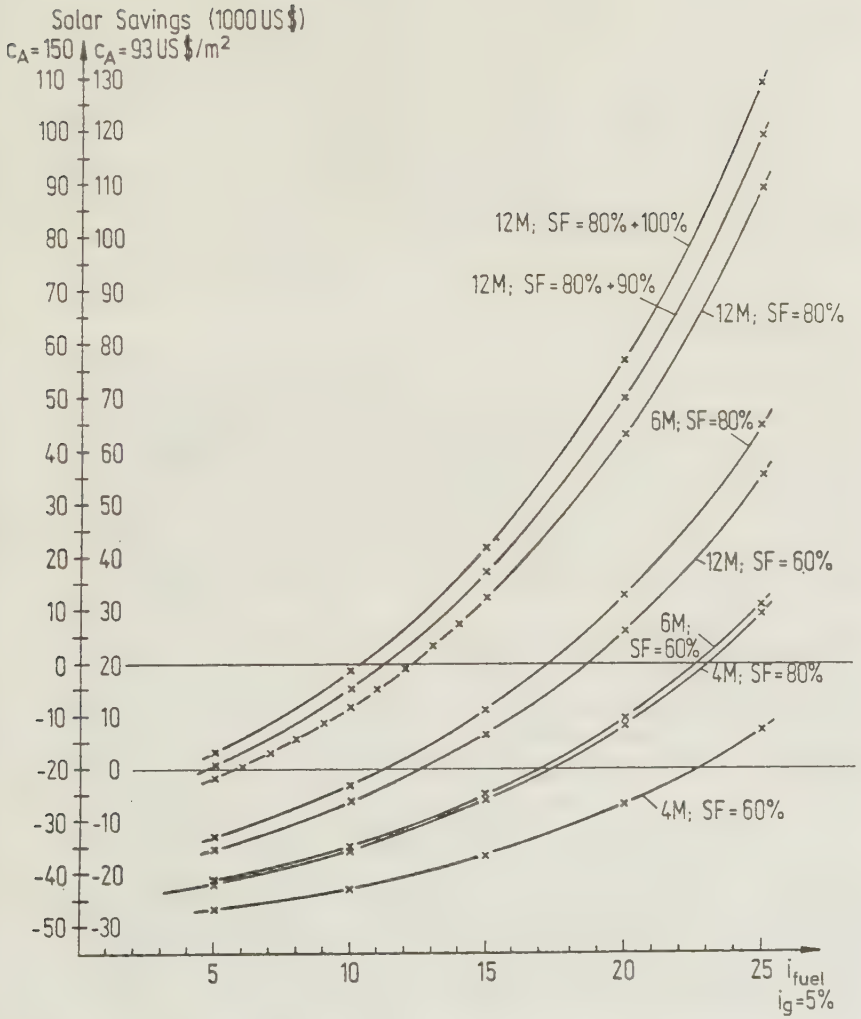


Abb. 6.2: Lebenszeiteinsparungen durch Sonnenenergie

i_{fuel} (%)	LCS (US $)
6	514,79
7	3 037,64
8	5 770,89
9	8 732,13
11	15 421,70
12	19 194,01
13	23 284,73
14	27 720,98

6.5 Zusammenfassung

Die Resultate belegen, daß Einsparungen auch unter optimistischen Annahmen nur bei ganzjähriger Nutzung erreicht werden können und dies auch nur unter Zugrundelegung günstiger ökonomischer Parameterkonstellationen. Einen weiteren Unsicherheitsfaktor stellt die angenommene Lebensdauer der Anlage von 15 Jahren dar. Verringert sie sich, so läßt nur eine drastische Steigerung der Ölpreise eine Amortisation erwarten.

Anders dagegen sieht die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aus, wenn kostengünstige Selbstbaukollektoren eingesetzt werden. Der Anschaffungspreis der Anlage würde sich von 121 790 US $ auf 79 781 US $, also um etwa ein Drittel, reduzieren. In diesem Falle wäre bei ganzjähriger Nutzung schon bei geringen Ölpreiserhöhungen mit Einsparungen zu rechnen, vorausgesetzt, der solare Deckungsanteil betrüge mehr als 60 %. Wird die Anlage jedoch nur wenige Monate im Jahr für die Trocknung von Tabak bzw. landwirtschaftlicher Produkte genutzt und ist von einem solaren Deckungsanteil, der unter den für die Berechnung getroffenen Annahmen liegt, auszugehen, so wird sich auch ein Low-Cost-System als nicht rentabel erweisen.

7. Schlußbetrachtung

Die in der Einleitung formulierte Fragestellung zum Betriebs- und Leistungsverhalten einer in Argentinien installierten solarbetriebenen Tabaktrocknungsanlage wurde mit Hilfe eines Simulationsmodells untersucht. Es galt, ein Computermodell zu entwickeln, das zuverlässige Ergebnisse erzielt. Um dies zu garantieren, wurde eine Methode gewählt, die den komplizierten Vorgang von der Identifikation des realen Systems bis zur Validation des fertigen Modells in mehrere unterscheidbare und kontrollierbare Schritte zerlegt.

Wegen seines modularen Aufbaus wurde für diese Untersuchung der TRNSYS-Simulator eingesetzt, der durch aufwendige Overlay-Techniken für die Implementierung auf einem 16-Bit-Rechner modifiziert wurde. Unter Ausschöpfung des gesamten Leistungsspektrums des Simulators wurde ein flexibles Modell der Solaranlage mit vielfältigen Einsatzbereichen entwickelt.

Die Modellqualifikation ergab, daß die Komponenten Kollektorfeld, Speicher, Gebläse und Leitungssystem, Anlagenregelung und Leckagen zufriedenstellend nachgebildet werden konnten. Da über den komplexen Vorgang der gekoppelten Wärme- und Stoffübertragung im Tabakbündel nur unzureichende Informationen vorliegen, ist die Erstellung eines anpassungsfähigen Trocknermodells nicht möglich. Statt dessen wurde auf Meßdaten eines Standardtrockenzyklus zurückgegriffen, so daß das Modell als feste Lastvorgabe an die Solaranlage diente.

Die Validation belegte, daß das Gesamtmodell das thermische Verhalten der realen Anlage mit einer Genauigkeit von ca. $\pm 6^{\circ}$ C wiedergibt. Es wurde nachgewiesen, daß die Temperaturvorgaben für den Trocknungsprozeß, aufgrund derer die Regelung der Solaranlage konzipiert wurde, falsch sind und nach oben hin korrigiert werden müssen, um den für die Trocknung notwendigen Wärmebedarf zu decken. Hauptsächlich jedoch tragen Leckagen in Kollektorfeld und Speicher zum unbefriedigenden Leistungsverhalten der Anlage bei. So betragen die Ausblasverluste im

Kollektorfeld bei Druckbetrieb etwa 60 % des Eingangsmassenstroms, und bei Saugbetrieb liegt der Austrittsmassenstrom ca. 20 % über dem am Eintritt. Beim Speicheraufladen werden durch Leckagen im Dach ebenfalls 20 % des Eingangsmassenstroms ausgeblasen. Ein Abdichten des Systems würde zu einer Erhöhung des Deckungsanteils von 34 auf 43 % führen. Eine Verbesserung der optischen Eigenschaften des Kollektorfeldes, d.h. Erhöhung der Transmission durch Austausch der Abdeckung, brächte noch einmal eine Steigerung des Deckungsanteils um ca. 10 %.

Die Resultate einer ausführlichen Wirtschaftlichkeitsanalyse belegen, daß sich die reale Anlage auch unter optimistischen Annahmen für den Deckungsanteil nur unter Zugrundelegung günstiger ökonomischer Parameterkonstellationen amortisieren wird. Es ist allerdings vorstellbar, daß durch Selbstbau der Kollektoren oder eine rationelle Massenfertigung die hohen Investitionskosten gesenkt werden könnten.

Eine Analyse der Rechenläufe zeigt, daß bei der in dieser Studie beschriebenen Betriebsweise - ein Kollektorfeld ist für die Versorgung des gesamten Zyklus zuständig - die Anlage in der ersten Trocknungsphase nicht ausgelastet und in der dritten überlastet ist. Es müßte eingehend untersucht werden, wie sich das Anlagenverhalten bei Betrieb mit zwei Kollektorfeldern, die in eng vorgegebenen Temperaturbereichen arbeiten, auf den Gesamtdeckungsanteil auswirkt. Eine weitere wichtige Fragestellung wäre, wie die Anlage vor und nach der Tabaktrocknungssaison zum Auftrocknen anderer landwirtschaftlicher Produkte genutzt werden könnte. Nicht behandelt in dieser Arbeit wurde weiterhin die Variation des Tabaktrockungsprozesses. Diesen Aspekt genauer zu erforschen scheint besonders im Hinblick darauf, daß der Einsatz von Solarenergie nicht losgelöst von den damit verknüpften Prozessen betrachtet werden darf, notwendig. Im Rahmen einer rationellen Energieverwendung sollte vielmehr gleichzeitig untersucht werden, inwieweit konventionelle Prozeßführungen modifiziert werden können, so daß sie sich für den Betrieb mit Solarenergie besser eignen.

A N H A N G 1

Überblick über vorhandene Simulatoren

SHAC Manual Design Methods Summary

The following table describes solar heating and cooling manual design methods. This table does not give all of the design methods applicable to SHAC analysis, but it does contain the most currently used and best known methods. These methods do not require access to a computer although some (e.g., F-CHART) have been implemented on computers. They vary in degree of sophistication from the simple, almost rule-of-thumb type to methods requiring programmable calculators. Some of the latter type methods are available from the source indicated as prerecorded programs on magnetic cards.

Description	Author	Availability			Application				Col. Type		System Type		Tools Required					Basis of Method			Output			
		Cost ($)	Date	Reference/Source	Space Heat	Domestic Hot Water	Space Cooling	Economic Analysis	Liquid	Air	Active	Passive	Graphs, Tables	Hand Calculator	Small Programmable Calculator	Programmable Calculator	Detailed Simulation	F-Chart Correlation	Other Correlation	Solar Fraction	Collector Area	Other
A Simplified Method for Calculating Solar Collector Array Size for Space Heating	J D Balcomb and J C Hedstrom		1976	Sharing the Sun: Solar Technology in the Seventies, Vol 4, American Section, International Solar Energy Society, 1976, pp 281-284	•	•			•	•	•		•	•					•		•		
Passive Solar Design Handbook	J D Balcomb and Bruce Anderson		Early 1980	Will be available from NTIS 5285 Port Royal Road Springfield, VA 22161	•							•	•	•					•	•			
Optimal Sizing of Solar Collectors by the Method of Relative Areas	C D Barley and C B Winn		1978	Solar Energy, Vol 21, No 4, 1978, pp 279-289	•	•		•	•	•	•		•			•		•			•		
MESH	Dr John Clark		1978	Dr John Clark Central Solar Energy Research Corp 1200 6th Street, Room 328 Detroit, MI 48226	•			•	•	•	•					•			•	•	•	•		
Predicting the Performance of Solar Energy Systems	U S Army Construction Engineering Research Lab		1977	Dept No AD-A035 608/9 ST (NTIS)	•	•	•	•	•	•	•		•	•					•	•	•			
Copper Brass Bronze Design Handbook—Solar Energy Systems	Copper Development Association	3	1978	Copper Development Association, Inc 1011 High Ridge Road Stamford, CN 06905	•	•			•	•	•		•	•					•	•	•			
PEGFIT and PEGFLOAT	W Glennie	75 both	1978	Princeton Energy Group 729 Alexander Road Princeton, NJ 08540	•							•				•	•							•
Solarcon Programs ST35S and ST36S	A W Graeff	239 both 142 each 15 weather data	1977	Solarcon, Inc 607 Church Street Ann Arbor, MI 48104	•	•		•	•	•	•					•			•	•				
Solarcon Program ST33	A W Graeff	138	1979	Solarcon, Inc	•							•				•	•			•				
Solar Heating Systems Design Manual	ITT Corporation Fluid Handling Division	2.50	1977	Bulletin TESE 576 Rev 1 ITT Training & Education Dept Fluid Handling Division Morton Grove, IL 60053	•	•			•	•	•		•	•				•			•			
A General Design Method for Closed-Loop Solar Energy Systems	S A Klein and W A Beckman		1977	Proceedings of the 1977 Annual Meeting, Vol 1 American Section, International Solar Energy Society, 1977, pp 8.1-8.5			•		•		•		•			•			•		•			
Solar Heating Design by the F-Chart Method	S A Klein, W A Beckman, and J A Duffie	10	1977	John Wiley and Sons, New York, N Y 1977 (Publisher)	•	•		•	•	•	•		•	•					•		•			
A Design Procedure for Solar Heating Systems	S A Klein, W A Beckman, and J A Duffie		1976	Solar Energy, Vol 18, No 2, 1976, pp 113-127	•	•			•				•			•				•	•			
TEAMET	J T Kohler and P W Sullman	95	1978	Total Environmental Action, Inc Church Hill Harrisville, NH 03450	•							•				•	•							•

The GFL Method for Sizing Solar Energy Space and Water Heating Systems	G F Lameiro and P Bendt		1978	Rept No SERI-30 Solar Energy Research Institute 1617 Cole Boulevard Golden, CO 80401	•				•	•	•		•		•			•		•		
A Design Handbook for Direct Heat Transfer Passive Solar Systems	R M Lebens	10	1978	Northeast Solar Energy Association P O Box 541, 22 High Street Brattleboro, VT 05301	•			•				•	•			•	•			•		
A Rational Procedure for Predicting the Long Term Average Performance of Flat-Plate Solar Energy Collectors	B Y H Liu and R C Jordan		1963	Solar Energy, Vol. 7, No 2, 1963, pp 53-70	•	•			•	•	•		•		•		•			•		
Pacific Regional Solar Heating Handbook	Los Alamos Scientific Lab		1976	Rept No TID-27630 (NTIS)	•	•			•	•	•		•		•				•	•		
Prediction of the Monthly and Annual Performance of Solar Heating Systems	P J Lunde		1977	Solar Energy, Vol 20, No 3, 1977, pp 283-287	•	•			•		•		•	•					•	•		
SCOTCH Program	R McClintock	195 Thermal alone, 175, econ anal alone, 75	1977	SCOTCH Programs P O Box 430734 Miami, FL 33143	•	•		•	•	•	•				•			•		•	•	
Solar Heating of Buildings and Domestic Hot Water	Naval Facilities Engineering Com. E J Beck, Jr and R L Field		1976	Rept No. AD-A021 862/8ST (NTIS)	•	•		•	•	•	•		•					•			•		
PCTS	J Schoenfelder	F-Chart Therm 35, F-Chart Econ 35	1978	Central States Research Corp P O Box 2623 Iowa City, IA 52240	•	•		•	•	•	•				•			•			•		
Domestic Hot Water Manual Using Sunearth Solar Collector Systems	Sunearth Corp	3	1976	Sunearth Solar Products Corp Technical Services A D 1 P O Box 337 Green Lane, PA 18054		•			•		•		•					•			•		
An Averaging Technique for Predicting the Performance of a Solar Energy Collector System	G H Sterland		1976	Sharing the Sun, Vol 4, 1978, pp 295-315	•	•			•	•	•	•	•		•		•			•		
Calculation of Long-Term Solar Collector Heating System Performance	S R Swanson and R F Boem		1977	Solar Energy, Vol 19, No 2, 1977, pp 129-138	•				•	•	•		•		•			•		•		
Minimum Cost Sizing of Solar Heating Systems	J C Ward		1978	Sharing the Sun, Vol 4, 1978, pp 336-348	•			•	•	•			•		•			•		•	•	
Designing and Building a Solar House, Your Place in the Sun	D Watson	9	1977	Garden Way Publishing Charlotte, VT 05445	•	•		•	•	•	•		•	•			•			•		
SEEC I — Heat Load, Monthly Solar Fraction, Economics	C B Winn	125	1976	Solar Environmental Engineering Co., Inc 2524 East Vine Drive Fort Collins, CO 80522	•	•		•	•	•	•				•			•		•		
SEEC II — Collector Optimization, Annual Solar Fraction, Economics	C B Winn, D Barley, G Johnson, J Lellar	95	1978	Solar Environmental Engineering Co., Inc	•	•	•	•	•	•	•				•			•			•		
SEEC III — SEEC II Plus Insulation Optimization	C B Winn, D Barley, G Johnson, J Lellar	125	1978	Solar Environmental Engineering Co., Inc	•	•		•	•	•	•				•			•			•		
SEEC VI — Passive Solar Heating	C B Winn, D Barley, G Johnson, J Lellar	125	1978	Solar Environmental Engineering Co., Inc.	•			■				•			•				•	•			
Sunshine Power Programs for Modeling Solar Energy Components and Systems	G Shramek	30-00	1977	Sunshine Power Co 1018 Lancer Drive San Jose, CA 95129	•	•		•	•	•	•	•			•	•	•	•	•			•	
Matrix Design Patterns (Rule-of-Thumb) in The Passive Solar Energy Book	Edward Mazria	11	1979	Rodale Press, Emmaus, PA 18049	•				•	•		•	•			•			•	•	•		

SHAC Computer Methods Summary

The following summary table and text describe the most frequently used and currently available solar analysis computer methods. The information was obtained largely from a program author survey conducted by Arthur D. Little, Inc. for the Electric Power Research Institute and primarily reflects the opinions of each program author.

Most summary table categories are self-explanatory; however, the intended user category needs emphasis. Programs suitable for use by builders were limited to the interactive type program that interrogates the user by a question and answer methodology. Architects/engineers use mainly design-oriented computer programs and generally restrict their analysis to standard input/output options of the program. The research engineer generally has hands-on access to the program and is very familiar with both the operation and assumptions of the program and the details of the system being analyzed.

Program Name	Latest Version	Availability				Application							Intended Users			Computation Interval		Computer Versions Available	Economic Analysis	Sponsor
		Purchase ($)	Time Share	Special Arrangements	Comments	User Manual	Service Hot Water	Space Heating	Space Cooling	Process Heat	Active System	Passive System	Research Engineers	Architect/Engineers	Builders	Hour	Month			
ACCESS*	1978	10,000		•	No cost to EEI members	•	•	•	•	•	•		•	•				IBM	•	Edison Electric Institute (EEI)
BLAST*	1978	300	•		Training available	•	•	•	•		•		•	•		•		CDC	•	USAF, USA, GSA
DEROB	1979	Nom.				•		•	•			•	•	•		•		CDC		NSF, ERDA, DOE
DOE-2*	1979	400	•			•	•	•	•		•	•	•	•		•		CDC	•	LASL, DOE
EMPSS	1978	500		•	Consulting with ADL	•	•	•	•		•		•	•		•		IBM	•	EPRI
F-CHART	1978	100	•		Training available	•	•	•			•			•	•		•	CDC, IBM UNIVAC	•	DOE
FREHEAT	1979	150			Limited documentation			•				•	•			•		CDC	•	DOE
HISPER	1978	Avail. on request			Limited documentation		•	•	•		•		•			•		UNIVAC		NASA, MSFC
HUD-RSVP-2	1979	175	•		Based on F-CHART	•	•	•			•	△		•	•		•	CDC UNIVAC	•	HUD
SHASP	1978	Avail. on request				•	•	•	•		•		•			•		UNIVAC	•	DOE
SIMSHAC	1973	300					•	•			•		•			•		CDC	•	NSF
SOLAR-5	1979		•					•	•			•		•	•	•	•	CDC		UCLA, DOE
SOLCOST	1979	300	•			•	•	•			•			•	•		•	CDC, IBM UNIVAC	•	DOE
SOLOPT	1978	20				•	•	•			•		•				•	AMDAHL	•	Texas A&M Univ.
SOLTES	1979				Available Argonne Fall 1979	•				•	•		•			•		CDC		Sandia
SUNCAT	1979	Nom.			Limited documentation	•		•				•	•	•		•		Data General Eclipse	•	NCAT
SUNSYMB	1979		•	•		•	•	•	•		•			•		•		IBM	•	Sunworks Comp. Systems
SYRSOL	1978	Nom.			Avail. but not actively marketed		•	•	•			•	•	•	•	•		IBM	•	ERDA, NSF, DOE
TRACE SOLAR*	1979		•	•		•	•	•	•	•	•		•	•		•	•	IBM	•	The Trane Co.
TRNSYS	1979	200	•		Training required	•	•	•	•		•	△	•			•		CDC, IBM UNIVAC		DOE
TWO ZONE	1977			•		•		•	•			•	•			•		CDC	•	LBL
UWENSOL	1978	200				•		•				•	•			•		CDC		State of Wash.
WATSUN II	1978	200				•	•	•			•		•			•		IBM	•	Nat'l Research Center of Can.

*Programs are primarily developed for large-scale, multi-zone applications

△ Being added

A N H A N G 2

TRNSYS-Komponentenbibliothek

Version 11.1

4.0 Introduction
4.1 Flat Plate Solar Collector
4.2 On/Off Differential Controller with Hysteresis
4.3 Pump
4.4 Stratified Fluid Storage Tank
4.5 Heat Exchanger
4.6 On/Off Auxiliary Heater
4.7 Absorption Air Conditioner
4.8 Three Stage Room Thermostat
4.9 Data Reader (for input of meteorologicalaand other data)
4.10 Rock Bed Thermal Storage
4.11 Tee Piece, Flow Diverter and Flow Mixer
4.12 Energy/(Degree-Hour) Space Heating or Cooling Load
4.13 Pressure Relief Valve
4.14 Time Dependent Forcing Function
4.15 Algebraic Operations
4.16 Solar Radiation Data Processor
4.17 Wall or Flat Roof
4.18 Roof and Attic
4.19 Room and Basement
4.20 Heat Pump
4.21 Liquid Collector-Storage Subsystem
4.22 Air Collector-Storage Subsystem
4.23 Domestic Hot Water Subsystem
4.24 Quantity Integrator
4.25 Printer
4.26 Plotter
4.27 Histogram Plotter
4.28 Simulation Summary
4.29 Economics
4.30 CPC Collector
4.31 Pipe and Duct
4.32 Cooling Coil
4.33 Humidity Ratio and Wet Bulb
4.34 Overhang and Wingwall Shading
4.35 Window with Variable Insulation
4.36 Thermal Storage Wall
4.37 Not Currently Used
4.38 Not Currently Used
4.39 Not Currently Used
4.40 Microprocessor Control

A N H A N G 3

Trocknungsprozeß und Trocknungspotential, dargestellt am Mollier-h,x-Diagramm für feuchte Luft

Die Berechnung des Trocknungspotentials wird durch die Darstellung des Prozesses im h,x-Diagramm erläutert.
Bei der solar unterstützten Trocknung bezeichnet man mit Trocknungspotential die Menge Wasser, die 1 kg im Kollektor vorgewärmte Luft beim Durchströmen des Trockners aufnehmen kann. Bei der Bestimmung wird wie folgt vorgegangen:

Punkt (1) ist gegeben durch die mittlere absolute Feuchte x und die mittlere Umgebungstemperatur T_∞. Im eingezeichneten Beispiel ist $T_\infty = 20^\circ$ C und $x_1 = 0{,}01$ kg/kg, was einer mittleren relativen Feuchte $\varphi_1 = 68$ % entspricht. Diese Luft passiert den Kollektor und wird auf die mittlere Austrittstemperatur $T_A = 40^\circ$ C erwärmt (Zustand (2)). Da im Kollektor der Luft kein Wasser zu- bzw. abgeführt wird, bleibt die absolute Feuchte von $x_2 = 0{,}01$ kg/kg erhalten, die relative Feuchte wird auf $\varphi_2 = 21{,}5$ % reduziert. Diese Luft wird nun durch den Trockner geleitet.
Bei der Trocknung handelt es sich näherungsweise um eine adiabatische Zustandsänderung der Luft, d.h. der Energieinhalt bleibt unverändert. Bei dieser Zustandsänderung wird dem Tabak Wasser entzogen und von der Luft aufgenommen; dabei nimmt die Temperatur der Luft ab, die relative und absolute Feuchte nehmen zu.
Punkt (3) charakterisiert den Zustand der Abluft: die mittlere relative Feuchte beträgt $\varphi_3 = 80$ %, das entspricht einer absoluten Feuchte von 0,016 kg/kg bei einer Temperatur von 25° C.
Das Trocknungspotential Δx_T ergibt sich als Differenz der absoluten Feuchten von Zustand (3) und Zustand (1) zu 0,006 kg/kg. Bei einem Durchsatz von 80 kg/(h m^2) und einer Betriebszeit von 8 h können mit 1 m^2 Kollektorfläche pro Tag 3,84 kg Wasser entzogen werden. Das Trocknungspotential ist eine Größe, die bei vorgegebenen Klimadaten eine Dimensionierung des Kollektors und Trockners in Abhängigkeit vom zu trocknenden Gut zuläßt.

© 1961 by Springer-Verlag OHG., Berlin/Göttingen/Heidelberg

Printed in Germany

Springer-Verlag 111/141/1, Berlin/Göttingen/Heidelberg

A N H A N G 4

Betriebscharakteristiken der Gebläse

Wichtig! Farbige Kennlinienfeld-Bereiche beachten.

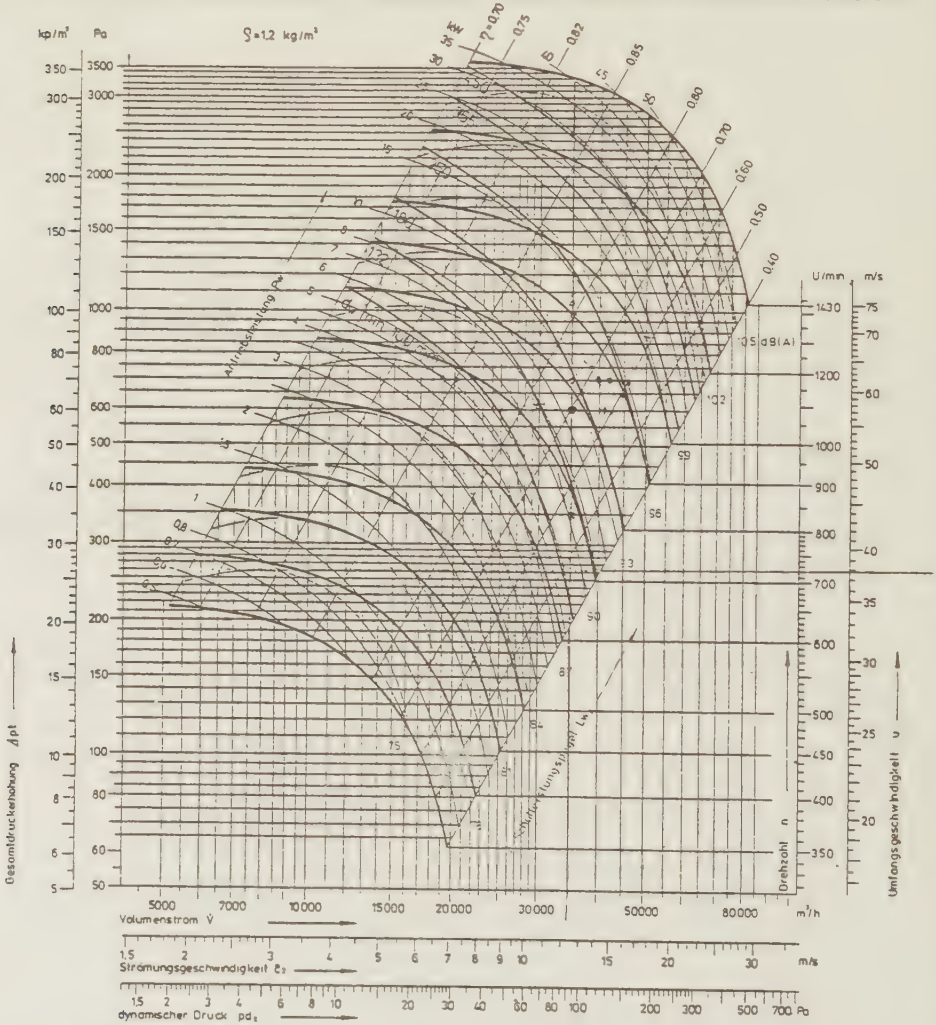
zulässiger Bereich.

in diesem Bereich nicht einsetzen.

RER 14–1000

Schutzrechte angemeldet

Mind.-Vent.Scheibendurchm. dw einhalten!



Laufraddurchmesser D = 1000 mm
Schaufelzahl z = 12
Schwungmoment GD^2 = 39 kpm²

$\bar{c}_2$ und pd_2 sind auf den Flanschquerschnitt am Ventilatoraustritt bezogen. Bei freiem Ausblasen ist $pd = pd_2 \times 2$.

A-Schallleistungspegel
Oktav-Schallleistungspegel
A-Schalldruckpegel

L_{WA} siehe Kennlinienfeld
$L_W \approx L_{WA} + L_{Wrel}$ dB
$L_{pA} \approx L_{WA} - 7$ dB(A) in 1 m Abstand

Mittenfrequenz Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
L_{Wrel} dB	+7,8	+2,3	+2,8	−3,2	−6,7	−9,2	−13,7	−18,2

RER 14-710

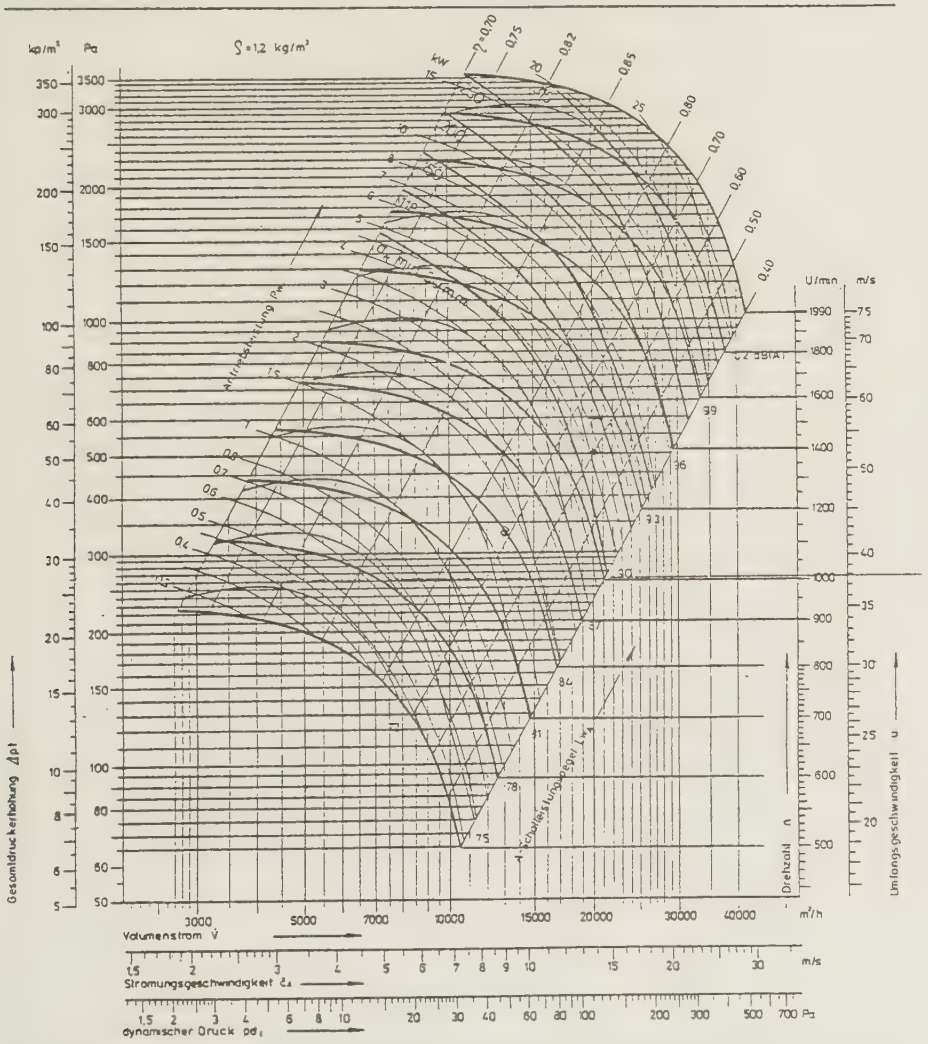
Wichtig! Farbige Kennlinienfeld-Bereiche beachten.

zulässiger Bereich.

in diesem Bereich nicht einsetzen.

Schutzrechte angemeldet

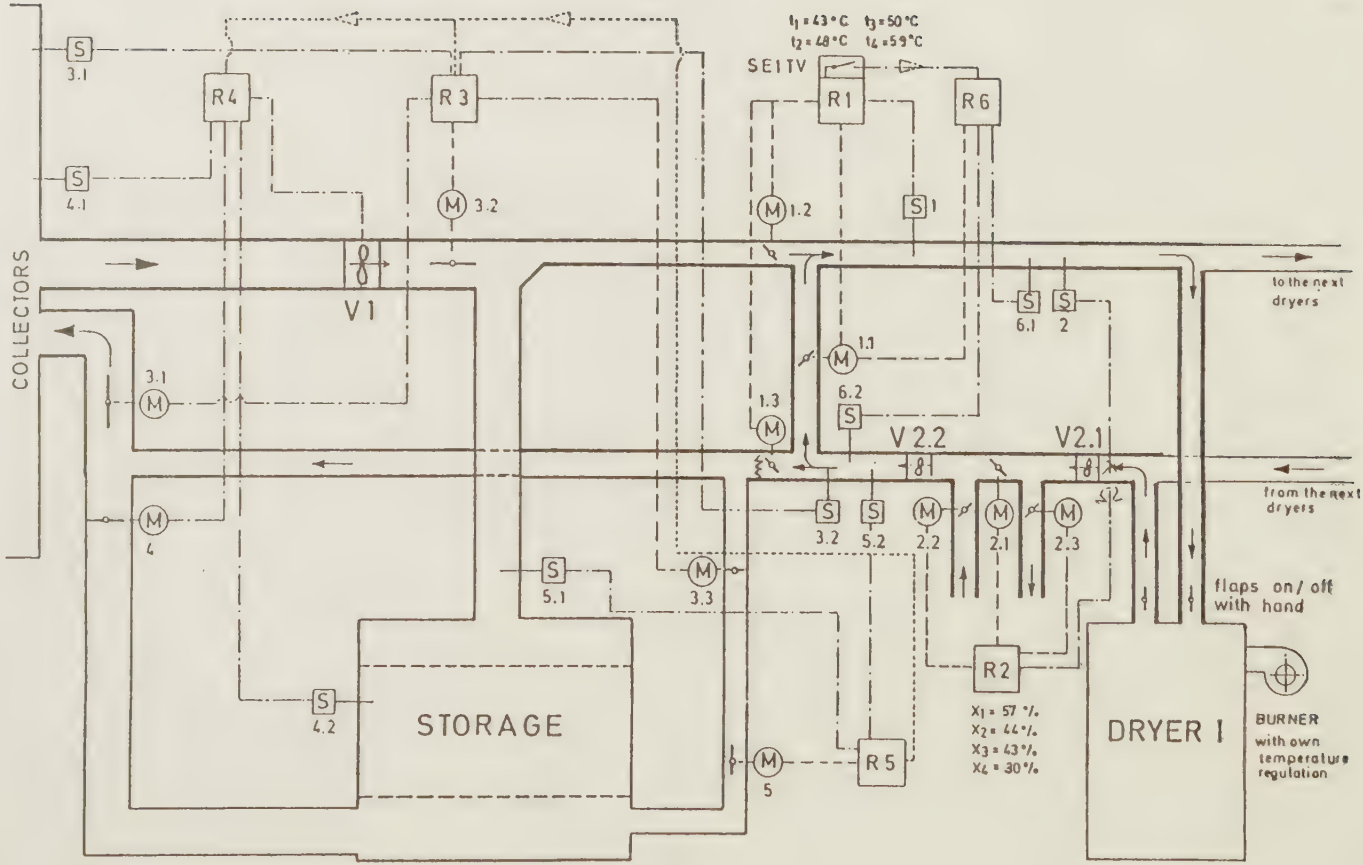
Mind.-Vent.Scheibendurchm. dw einhalten!



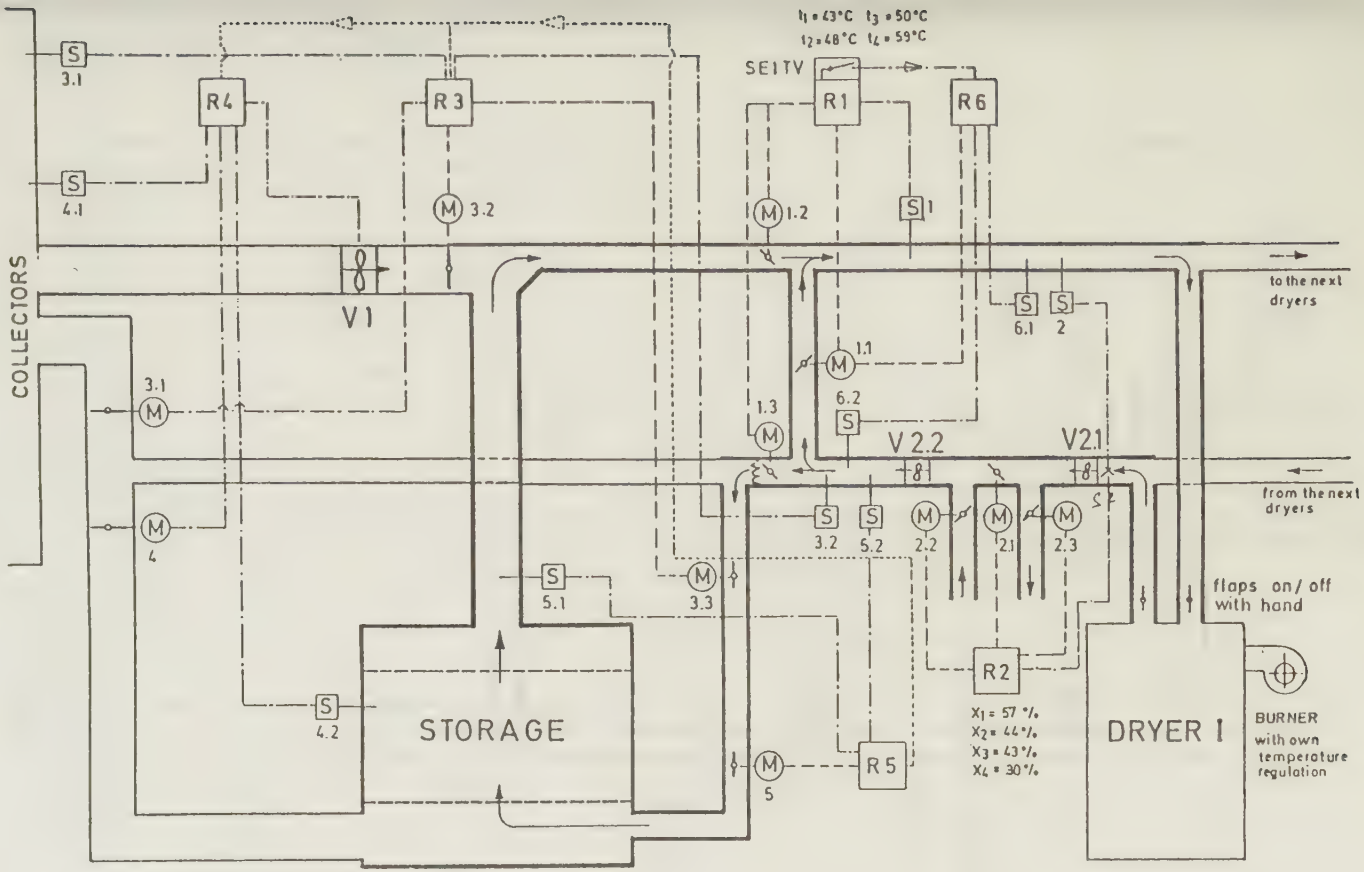
Laufraddurchmesser	D = 718 mm								
Schaufelzahl	z = 12								
Schwungmoment	GD^2 = 11 kpm²								
$\bar{c}_2$ und pd_2 sind auf den Flanschquerschnitt am Ventilatoraustritt bezogen. Bei freiem Ausblasen ist pd = pd_2 x 2.	A-Schalleistungspegel Oktav-Schalleistungspegel A-Schalldruckpegel								
	L_{WA} siehe Kennlinienfeld $L_W = L_{WA} + L_{Wrel}$ dB $L_{pA} \approx L_{WA} - 7$ dB(A) in 1 m Abstand								
	Mittenfrequenz Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	L_{Wrel} dB	+7,8	+2,3	+2,8	−3,2	−6,7	−9,2	−13,7	−18,2

A N H A N G 5

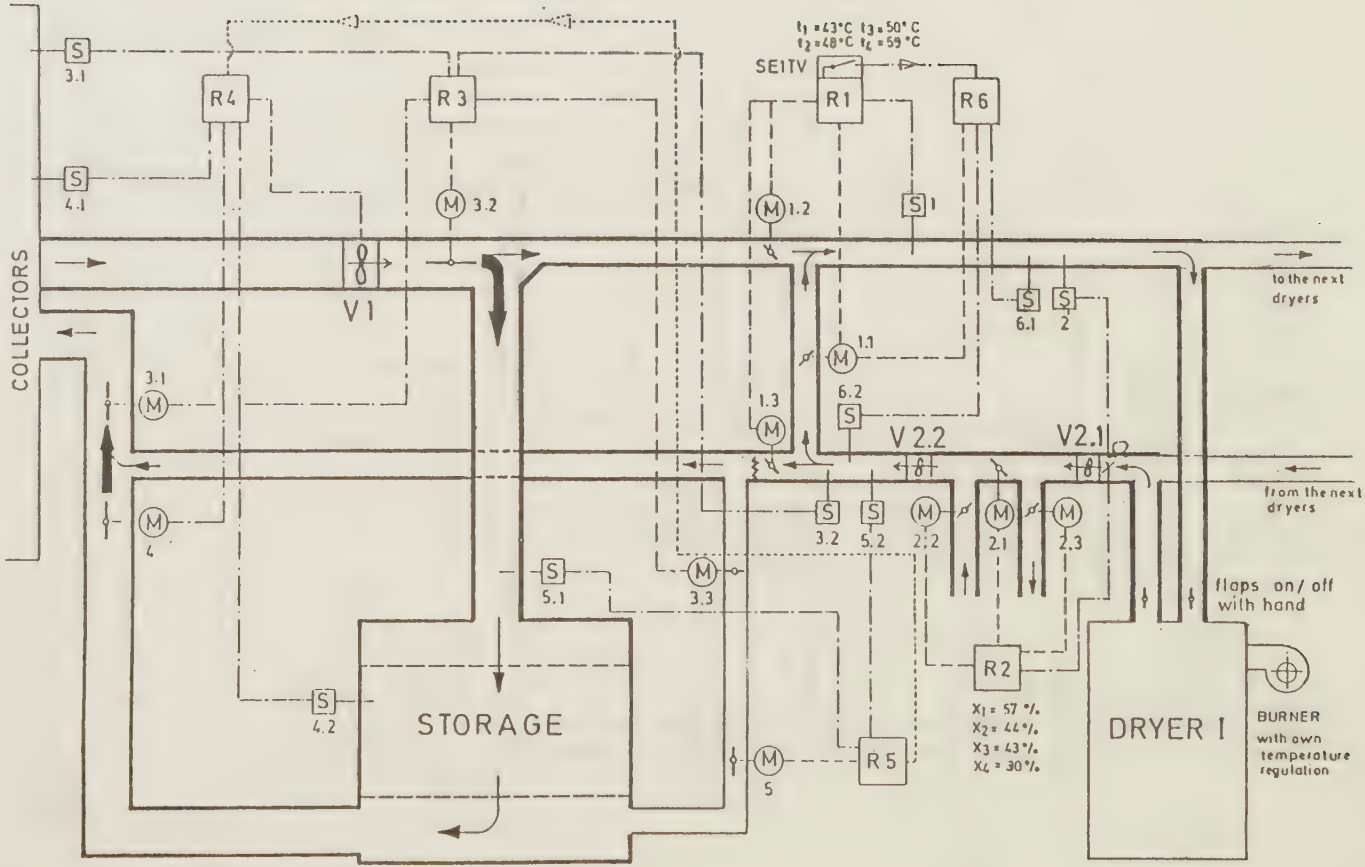
Schemata der Anlagenregelung



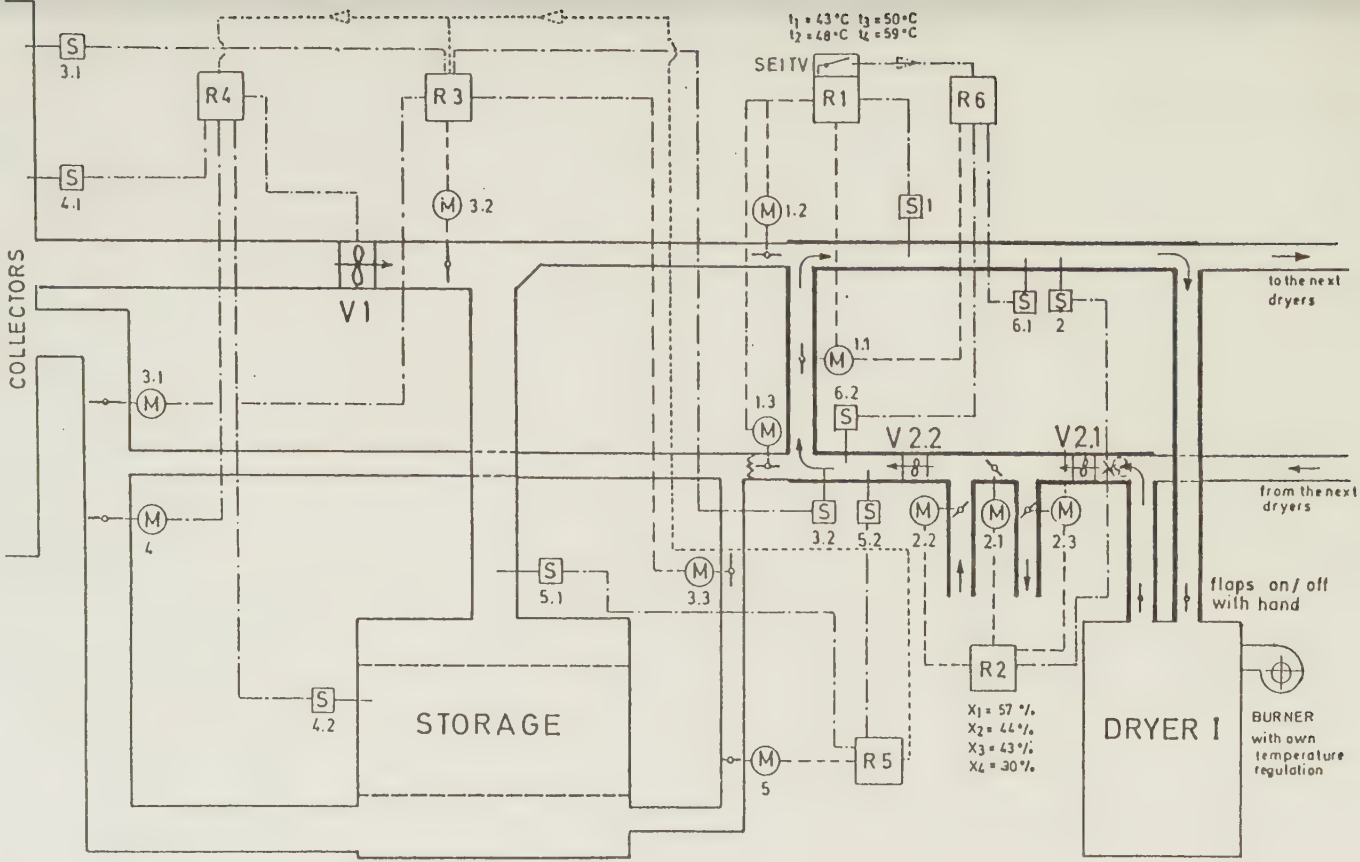
1) DRYING - small airflow rate over collectors



2) DRYING - storage discharge



3) DRYING AND STORAGE-LOADING



4) DRYING-only with burner

A N H A N G 6

TRNSYS-Listing und Komponentenverknüpfungsliste

von Modell 1

```
*****************************************************************
*                    T A S K   2 0                              *
*                 SIMULATION KOLLEKTORFELD                      *
*                  MIT SPEICHER (M.=CONST)                      *
*    EINSCHLIESSLICH LECKAGEN IN BEIDEN                         *
*    VALIDATION MIT MESSDATEN AUS SALTA                         *
*   KOMPONENTEN-INPUTS F. KOLLEKTOR, SPEICHER, ROHRLEITUNG      *
*   SIND  MODELLOUTPUTS.                                        *
*  TIMESTEP: 0.25, TOL.: -0.01, U4 P:4 5 5,DERIV.: 10, A.: 737   *
*****************************************************************

 SIMULATION          1.325E+01    1.675E+01    2.500E-01

 TOLERANCES         -1.000E-02   -1.000E-02

 LIMITS   50   50

 WIDTH    72

 MAP

 UNIT  1     TYPE  9     DATENLESER( UNFORMATIERT)
      PARAMETERS  5
      1.100E+01    2.500E-01    2.000E+00    3.600E+00    0.000E-01

 UNIT  2     TYPE 23      WASSERGEHALT
      PARAMETERS  2
      1.000E+00    1.000E+00
      INPUTS  2
       1, 4         1, 5
      2.820E+01    2.260E+01

 UNIT  6     TYPE  1     KOLLEKTORFELD GRAMMER
      PARAMETERS  7
      5.000E+00    7.370E+02    1.012E+00    1.000E+00    4.000E+00
      4.500E-01    1.156E+00
      INPUTS  6
      10, 1         0, 0         1, 4         1, 2         0, 0
       0, 0
      4.040E+01    2.234E+04    2.820E+01    3.692E+03    0.000E-01
      1.000E+00

 UNIT  3     TYPE  3     PUMPE 1
      PARAMETERS  1
      1.136E+04
      INPUTS  3
       1, 9         0, 0         0, 0
      4.000E+01    1.136E+04    1.000E+00

 UNIT  4     TYPE  2     CONTROLLER
      PARAMETERS  3
      4.000E+00    5.000E+00    5.000E+00
      INPUTS  3
       6, 1         9, 8         0, 0
      9.340E+01    3.360E+01    1.000E+00

 UNIT  5     TYPE 11     DIVERTER
      PARAMETERS  1
      2.000E+00
      INPUTS  3
       3, 1         3, 2         0, 0
      5.610E+01    1.136E+04    1.000E+00
```

```
UNIT  7     TYPE  3     PUMPE 2
     PARAMETERS  1
     2.582E+04
     INPUTS  3
      6, 1          6, 2          4, 1
     9.340E+01     2.582E+04     1.000E+00

UNIT  8     TYPE 11     DIVERTER
     PARAMETERS  1
     2.000E+00
     INPUTS  3
      7, 1          7, 2          0, 0
     9.340E+01     2.582E+04     4.650E-01

UNIT  9     TYPE 10      ROCK BED SPEICHER
     PARAMETERS  8
     1.012E+00     1.625E+00     7.800E+01     3.078E+01     8.800E-01
     1.500E+03     2.430E+00     4.500E-01
     INPUTS  5
      8, 1          0, 0          5, 1          5, 2          1, 4
     9.340E+01     1.098E+04     9.340E+01     0.000E-01     2.820E+01
     DERIVATIVES 13
     4.000E+01     4.000E+01     3.850E+01     3.900E+01     3.950E+01
     3.650E+01     3.360E+01     3.260E+01     3.160E+01     3.150E+01
     3.130E+01     3.100E+01     3.060E+01
     TRACE         1.650E+01     1.700E+01

UNIT 10     TYPE 11     TEE PIECE
     PARAMETERS  1
     1.000E+00
     INPUTS  4
      9, 1          0, 0          5, 3          5, 4
     3.000E+01     1.098E+04     5.610E+01     1.136E+04

UNIT 11     TYPE 11     TEE-PIECE
     PARAMETERS  1
     1.000E+00
     INPUTS  4
      8, 3          8, 4          9, 3          9, 4
     9.340E+01     1.201E+04     3.050E+01     0.000E-01

UNIT 13     TYPE 21     ROHRLEITUNG  26M
     PARAMETERS  4
     2.850E+02     0.000E-01     1.012E+00     8.090E+01
     INPUTS  3
     11, 1         11, 2          1, 4
     9.340E+01     1.201E+04     2.820E+01

UNIT 30     TYPE 15      STRHLG VON KJ/HM2 AUF W/M2
     PARAMETERS  1
     2.000E+00
     INPUTS  2
      1, 2          0, 0
     3.692E+03     3.600E+00

UNIT 40     TYPE 25     PRINTER 1
     PARAMETERS  3
     2.500E-01     1.325E+01     1.675E+01
     INPUTS 10
      1, 1         30, 1          1, 3          1, 4          1, 5
      2, 1          1, 6         10, 1          1, 7          6, 1
     STD           STR           WIND          TDB           TWB
     XUE           TEKM          TEKR          TAKM          TAKR
```

```
UNIT 41     TYPE 25     PRINTER 2
     PARAMETERS  3
     2.500E-01    1.325E+01    1.675E+01
     INPUTS  7
      1,10         8, 1         1,11         9, 1         1, 8
     13, 1         6, 7
     TESPM        TESPR        TASPM        TASPR        TETM
     TETR         ETA

UNIT 45     TYPE 26     PLOTTER VERGLEICH MESS U RECHN
     PARAMETERS  4
     2.500E-01    1.325E+01    1.675E+01   -1.000E+00
     INPUTS  5
      1, 4         1, 7         6, 1         1, 8        13, 1
     TUE          TAKM         TAKR         TETM         TETR

END
```

```
 TRNSYS COMPONENT OUTPUT MAP

UNIT  1 TYPE  9  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      40 25  1
     OUTPUT  2       6  1  4
                    30 15  1
     OUTPUT  3      40 25  3
     OUTPUT  4       2 23  1
                     6  1  3
                     9 10  5
                    13 21  3
                    40 25  4
                    45 26  1
     OUTPUT  5       2 23  2
                    40 25  5
     OUTPUT  6      40 25  7
     OUTPUT  7      40 25  9
                    45 26  2
     OUTPUT  8      41 25  5
                    45 26  4
     OUTPUT  9       3  3  1
     OUTPUT 10      41 25  1
     OUTPUT 11      41 25  3

UNIT  2 TYPE 23  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      40 25  6

UNIT  6 TYPE  1  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1       4  2  1
                     7  3  1
                    40 25 10
                    45 26  3
     OUTPUT  2       7  3  2
     OUTPUT  7      41 25  7

UNIT  3 TYPE  3  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1       5 11  1
     OUTPUT  2       5 11  2
```

```
UNIT  4 TYPE  2  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1       7  3  3

UNIT  5 TYPE 11  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1       9 10  3
     OUTPUT  2       9 10  4
     OUTPUT  3      10 11  3
     OUTPUT  4      10 11  4

UNIT  7 TYPE  3  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1       8 11  1
     OUTPUT  2       8 11  2

UNIT  8 TYPE 11  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1       9 10  1
                    41 25  2
     OUTPUT  3      11 11  1
     OUTPUT  4      11 11  2

UNIT  9 TYPE 10  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      10 11  1
                    41 25  4
     OUTPUT  3      11 11  3
     OUTPUT  4      11 11  4
     OUTPUT  8       4  2  2

UNIT 10 TYPE 11  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1       6  1  1
                    40 25  8

UNIT 11 TYPE 11  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      13 21  1
     OUTPUT  2      13 21  2

UNIT 13 TYPE 21  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      41 25  6
                    45 26  5

UNIT 30 TYPE 15  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      40 25  2

UNIT 40 TYPE 25  UNIT/TYPE/INPUT

UNIT 41 TYPE 25  UNIT/TYPE/INPUT

UNIT 45 TYPE 26  UNIT/TYPE/INPUT
```

A N H A N G 7

TRNSYS-Listing und Komponentenverknüpfungsliste

von Modell 2

```
**************************************************
*            T A S K  2 4                        *
*             BASISKONFIGURATION!!!!!!           *
*      SIMULATION KOLLEKTORFELD SPEICHER         *
*             TROCKNER                           *
*         MIT LECKAGEN IM KOLLEKTORFELD,         *
*   SPEICHERDACH, TROCKNER                       *
* LECKAGEN WERDEN NACH KOLLEKTOR WEITERBEARBEITET *
**************************************************

 SIMULATION          8.000E+00    1.300E+02    2.500E-01

 TOLERANCES         -1.000E-03   -1.000E-03

 LIMITS  100   50

 WIDTH    72

 MAP

 UNIT  1     TYPE  9     DATENLESER
      PARAMETERS  2
      7.000E+00    1.000E+00

 UNIT  2     TYPE 16     STRAHLUNGSPROZESSOR
      PARAMETERS  7
      3.000E+00    1.000E+00   -2.490E+01    1.500E+01    1.800E+02
      4.871E+03    2.000E-01
      INPUTS  1
       1, 5
      0.000E-01
      TRACE        0.000E-01    0.000E-01

 UNIT  3     TYPE  1      S3.1
      PARAMETERS  7
      5.000E+00    7.370E+02    1.012E+00    1.000E+00    4.000E+00
      4.500E-01    1.000E+00
      INPUTS  6
       6, 1         6, 2         1, 6         2, 1         0, 0
       0, 0
      2.000E+01    8.000E+03    2.000E+01    0.000E-01    1.000E+00
      0.000E-01
      TRACE        0.000E-01    0.000E-01

 UNIT  4     TYPE  1        S4.1
      PARAMETERS  7
      5.000E+00    7.370E+02    1.012E+00    1.000E+00    4.000E+00
      1.000E+00    1.200E+00
      INPUTS  6
       6, 1         0, 0         1, 6         2, 1         0, 0
       0, 0
      2.000E+01    2.000E+04    2.000E+01    0.000E-01    0.000E-01
      1.000E+00
      TRACE        0.000E-01    0.000E-01

 UNIT  5     TYPE  2     GAMMA 0 = TS3.1 - TTSP
      PARAMETERS  3
      3.000E+00    5.000E+00   -5.000E+00
      INPUTS  3
       3, 1        22, 3         5, 1
      2.000E+01    7.000E+01    0.000E-01
      TRACE        0.000E-01    0.000E-01
```

```
UNIT  6     TYPE  3     KLEINES GEBLAESE 4,2KW
     PARAMETERS  2
     8.000E+03    1.512E+04
     INPUTS  3
     42, 1        42, 2         0, 0
     2.000E+01    8.000E+03     1.000E+00
     TRACE        0.000E-01     0.000E-01

UNIT  7     TYPE  2      GAMMA 1 = TS4.1 - TMSP
     PARAMETERS  3
     3.000E+00    5.000E+00     5.000E+00
     INPUTS  3
      4, 1        22, 8         7, 1
     1.000E+01    4.000E+01     0.000E-01
     TRACE        0.000E-01     0.000E-01

UNIT  9     TYPE 11     STROEMUNGSTEILER SPEICHERENTLADEN/KOLLEKTORFELD
     PARAMETERS  1
     2.000E+00
     INPUTS  3
      6, 1         6, 2         5, 1
     2.000E+01    8.000E+03     0.000E-01
     TRACE        0.000E-01     0.000E-01

UNIT 10     TYPE 11     TEMP. KONTR. STROEM.TEILER F. KOLL.BYPASS
     PARAMETERS  2
     5.000E+00    1.000E+01
     INPUTS  4
      9, 3         9, 4         14, 1        37, 6
     2.000E+01    0.000E-01     2.000E+01    3.100E+01
     TRACE        0.000E-01     0.000E-01

UNIT 11     TYPE 11     TEMP. KONTR. STROEM TEILER SPEICHERBYPASS
     PARAMETERS  2
     5.000E+00    3.000E+00
     INPUTS  4
      9, 1         9, 2         22, 3        37, 6
     7.000E+01    8.000E+03     7.000E+01    3.100E+01
     TRACE        0.000E-01     0.000E-01

UNIT 12     TYPE 11     T - STUECK VOR KOLLEKTORFELD
     PARAMETERS  1
     1.000E+00
     INPUTS  4
     10, 1        10, 2         22, 1        22, 2
     2.000E+01    0.000E-01     2.000E+01    0.000E-01
     TRACE        0.000E-01     0.000E-01

UNIT 13     TYPE  7     SPEZ. CONTOLLER F. GAMMAG,GAMMAD,GAMMAK,LECKAGE
     PARAMETERS  4
     8.000E+03    2.400E+04     4.500E-01    1.200E+00
     INPUTS  8
     12, 1        12, 2         5, 1         7, 1         10, 2
     15, 1        37, 7         4, 1
     2.000E+01    0.000E-01     0.000E-01    0.000E-01    0.000E-01
     1.500E-02    3.000E-02     0.000E-01
     TRACE        0.000E-01     0.000E-01
```

```
UNIT 14     TYPE  1      KOLLEKTORFELD GRAMMER
     PARAMETERS  7
     5.000E+00    7.370E+02    1.012E+00    1.000E+00    4.000E+00
     4.500E-01    1.200E+00
     INPUTS  6
     13, 1        13, 2         1, 6         2, 1        13, 6
     13, 7
     2.000E+01    0.000E-01    2.000E+01    0.000E-01    0.000E-01
     0.000E-01
     TRACE        0.000E-01    0.000E-01

UNIT 15     TYPE 23      WASSERGEHALT DER UMGEBUNGSLUFT
     PARAMETERS  2
     2.000E+00    1.000E+00
     INPUTS  2
      1, 6         1, 7
     2.000E+01    8.700E+01
     TRACE        0.000E-01    0.000E-01

UNIT 18     TYPE  3     GROSSES  GEBLAESE 12 KW
     PARAMETERS  2
     2.400E+04    4.320E+04
     INPUTS  3
     14, 1        14, 2        13, 3
     2.000E+01    0.000E-01    0.000E-01
     TRACE        0.000E-01    0.000E-01

UNIT 19     TYPE 11     STROEMUNGSTEILER
     PARAMETERS  1
     2.000E+00
     INPUTS  3
     14, 1        14, 2        13, 4
     2.000E+01    0.000E-01    1.000E+00
     TRACE        0.000E-01    0.000E-01

UNIT 21     TYPE 11     SPEICHERLECKS IM DACH BEIM LADEN
     PARAMETERS  1
     2.000E+00
     INPUTS  3
     19, 1        19, 2        13, 5
     2.000E+01    0.000E-01    7.500E-01
     TRACE        0.000E-01    0.000E-01

UNIT 22     TYPE 10     KIESBETTSPEICHER
     PARAMETERS  8
     1.012E+00    1.625E+00    7.800E+01    3.078E+01    8.800E-01
     1.500E+03    2.430E+00    4.500E-01
     INPUTS  5
     21, 3        21, 4        11, 1        11, 2         1, 6
     2.000E+01    0.000E-01    2.000E+01    0.000E-01    2.000E+01
     DERIVATIVES 10
     7.000E+01    6.500E+01    6.000E+01    5.500E+01    5.000E+01
     4.000E+01    3.000E+01    2.000E+01    2.000E+01    2.000E+01
     TRACE        0.000E-01    0.000E-01

UNIT 23     TYPE 11     SPEICHERLECKS BEIM ENTLADEN
     PARAMETERS  1
     2.000E+00
     INPUTS  3
     22, 3        22, 4         0, 0
     7.000E+01    1.000E+03    1.000E+00
     TRACE        0.000E-01    0.000E-01
```

```
UNIT 24     TYPE 11     SPEICHER BYPASS
     PARAMETERS  1
     1.000E+00
     INPUTS  4
     11, 3          11, 4          22, 3          22, 4
     2.000E+01      0.000E-01      2.000E+01      8.000E+03
     TRACE          0.000E-01      0.000E-01

UNIT 25     TYPE 11     LECKAGEBEHANDLUNG SPEICERENTLADEN VOR TROCKNER
     PARAMETERS  1
     1.000E+00
     INPUTS  4
     24, 1          11, 4          24, 1          23, 4
     3.400E+01      7.000E+03      3.400E+01      1.000E+03
     TRACE          0.000E-01      0.000E-01

UNIT 28     TYPE 11      KOLLEKTORBYPASS
     PARAMETERS  1
     1.000E+00
     INPUTS  4
     19, 3          13, 9          10, 3          10, 4
     2.000E+01      0.000E-01      2.000E+01      0.000E-01
     TRACE          0.000E-01      0.000E-01

UNIT 29     TYPE 11     LECKAGEBEHANDLUNG VOR TROCKNEREINTRITT
     PARAMETERS  1
     1.000E+00
     INPUTS  4
     28, 1          19, 4          28, 1          10, 4
     2.000E+01      0.000E-01      2.000E+01      0.000E-01
     TRACE          0.000E-01      0.000E-01

UNIT 30     TYPE 11     T-STUECK
     PARAMETERS  1
     1.000E+00
     INPUTS  4
     25, 1          25, 2          29, 1          29, 2
     3.100E+01      8.000E+03      2.000E+01      0.000E-01
     TRACE          0.000E-01      0.000E-01

UNIT 31     TYPE 21     ROHRLEITUNG
     PARAMETERS  4
     1.500E+01      0.000E-01      1.005E+00      2.050E+01
     INPUTS  3
     30, 1          30, 2           1, 6
     3.000E+01      8.000E+03      2.000E+01
     TRACE          0.000E-01      0.000E-01

UNIT 32     TYPE 14     TAT
     PARAMETERS 24
     8.000E+00      3.000E+01      2.000E+01      3.100E+01      3.200E+01
     3.300E+01      4.400E+01      3.400E+01      5.600E+01      3.450E+01
     6.800E+01      3.600E+01      8.000E+01      3.850E+01      9.200E+01
     5.300E+01      1.040E+02      6.400E+01      1.160E+02      7.000E+01
     1.280E+02      7.000E+01      1.280E+02      3.000E+01
     TRACE          0.000E-01      0.000E-01
```

```
UNIT 33     TYPE 14     TIT
     PARAMETERS 24
     8.000E+00    3.000E+01    2.000E+01    3.400E+01    3.200E+01
     3.700E+01    4.400E+01    4.000E+01    5.600E+01    4.300E+01
     6.800E+01    4.600E+01    8.000E+01    5.000E+01    9.200E+01
     5.700E+01    1.040E+02    6.600E+01    1.160E+02    7.200E+01
     1.280E+02    7.200E+01    1.280E+02    3.000E+01
     TRACE        0.000E-01    0.000E-01

UNIT 34     TYPE 14     DMW
     PARAMETERS 22
     8.000E+00    0.000E-01    2.000E+01    4.250E+01    3.200E+01
     4.920E+01    4.400E+01    8.590E+01    5.600E+01    1.125E+02
     6.800E+01    1.709E+02    8.000E+01    1.500E+02    9.200E+01
     6.420E+01    1.040E+02    2.080E+01    1.160E+02    1.250E+01
     1.280E+02    1.250E+01
     TRACE        0.000E-01    0.000E-01

UNIT 35     TYPE 14     XIT
     PARAMETERS 24
     8.000E+00    2.800E-02    2.000E+01    3.200E-02    3.200E+01
     3.600E-02    4.400E+01    3.700E-02    5.600E+01    3.700E-02
     6.800E+01    4.000E-02    8.000E+01    4.300E-02    9.200E+01
     4.500E-02    1.040E+02    4.800E-02    1.160E+02    4.900E-02
     1.280E+02    4.900E-02    1.280E+02    2.800E-02
     TRACE        0.000E-01    0.000E-01

UNIT 36     TYPE 15     S O L L A S T
     PARAMETERS  7
     0.000E-01    0.000E-01    0.000E-01    0.000E-01    4.000E+00
     1.000E+00    1.000E+00
     INPUTS  4
      0, 0         0, 0         37, 6         6, 1
     8.000E+03    1.012E+00    3.000E+01    2.000E+01
     TRACE        0.000E-01    0.000E-01

UNIT 37     TYPE 28     TROCKNER
     PARAMETERS  5
     4.000E-01    5.000E-01    1.012E+00    8.000E+03    2.000E+00
     INPUTS  8
     31, 1        31, 2        13, 8        33, 1        35, 1
     34, 1        32, 1         1, 6
     3.000E+01    8.000E+03    3.000E-02    3.100E+01    0.000E-01
     9.000E+00    2.800E+01    2.000E+01
     TRACE        0.000E-01    0.000E-01

UNIT 39     TYPE 15     S O L A R L O A D
     PARAMETERS  7
     0.000E-01    0.000E-01    0.000E-01    0.000E-01    4.000E+00
     1.000E+00    1.000E+00
     INPUTS  4
     31, 2         0, 0         31, 1         6, 1
     8.000E+03    1.012E+00    3.000E+01    2.000E+01

UNIT 40     TYPE 15     BERECHNUNG DER AUSTAUSCHRATE
     PARAMETERS  7
     0.000E-01    0.000E-01    0.000E-01    4.000E+00    2.000E+00
     0.000E-01    2.000E+00
     INPUTS  4
     34, 1        37, 3        15, 1        37, 2
     0.000E-01    0.000E-01    1.500E-02    0.000E-01
     TRACE        0.000E-01    0.000E-01
```

```
UNIT 41     TYPE 11     STROEMUNGSTEILER
     PARAMETERS  1
     2.000E+00
     INPUTS  3
     37, 1          37, 2          40, 1
     3.000E+01      8.000E+03      0.000E-01
     TRACE          0.000E-01      0.000E-01

UNIT 42     TYPE 11     T- STUECK
     PARAMETERS  1
     1.000E+00
     INPUTS  4
     41, 1          41, 2           1, 6          41, 4
     2.000E+01      8.000E+03      2.000E+01      0.000E-01
     TRACE          0.000E-01      0.000E-01

UNIT 43     TYPE 15     L A S T E R F U E L L U N G
     PARAMETERS  1
     2.000E+00
     INPUTS  2
     46, 3          46, 7
     1.000E+00      1.000E+00
     TRACE          0.000E-01      0.000E-01

UNIT 44     TYPE 15     Q G E S A M T
     PARAMETERS  7
     0.000E-01      0.000E-01      3.000E+00      0.000E-01      3.000E+00
     0.000E-01      3.000E+00
     INPUTS  4
     39, 1           6, 3          18, 3          37, 4
     0.000E-01      0.000E-01      0.000E-01      0.000E-01

UNIT 45     TYPE 15     S O L A R F R A C T I O N
     PARAMETERS  1
     2.000E+00
     INPUTS  2
     46, 3          46, 2
     1.000E-05      1.000E-05

UNIT 46     TYPE 24     INTEGRATOR
     PARAMETERS  1
     4.400E+01
     INPUTS 10
     36, 1          44, 1          39, 1          37, 4           6, 3
     18, 3          36, 1          22, 6           2, 1          37, 5
     0.000E-01      1.000E-07      1.000E-07      0.000E-01      0.000E-01
     0.000E-01      1.000E-07      0.000E-01      0.000E-01      0.000E-01

UNIT 47     TYPE 25     DRUCKER
     PARAMETERS  3
     1.000E+00      8.000E+00      1.300E+02
     INPUTS 10
      1, 2           1, 3          15, 1           1, 6           2, 1
     14, 1          14, 2          14, 7          22, 8          31, 1
     TAG            STD            XUE            TUE            IKOLL
     TAK            MAK            ETAKOL         TMSP           TETVGL
```

A 7.7

```
UNIT 48     TYPE 25     DRUCKER
     PARAMETERS  3
     1.000E+00     8.000E+00     1.300E+02
     INPUTS 10
     37, 6         31, 2         37, 7         13, 8         37, 1
     41, 4         13, 6          7, 1          3, 1          4, 1
     TET           MET           XETSOL        XETIST        TAT
     MAUST         GAMA0         GAMA1         S31           S41

UNIT 49     TYPE 25     DRUCKER FURER INTEGRATOR UND SFR
     PARAMETERS  3
     1.000E+00     8.000E+00     1.300E+02
     INPUTS 10
     46,10         46, 2         45, 1         46, 3         46, 4
     46, 5         46, 6         46, 1         43, 1         46, 9
     QTAB          QGES          SF            QSOLAR        QZUS
     KLGEB         GRGEB         QLAST         LASERF        QSTR

UNIT 50     TYPE 26     PLOTTER
     PARAMETERS  4
     1.000E+00     8.000E+00     1.300E+02     1.000E+00
     INPUTS  5
      1, 6         14, 1         22, 8         37, 6         37, 1
     TUE           TAK           TMSP          TET           TAT

END



 TRNSYS COMPONENT OUTPUT MAP

UNIT  1 TYPE  9  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  2      47 25  1
     OUTPUT  3      47 25  2
     OUTPUT  5       2 16  1
     OUTPUT  6       3  1  3
                     4  1  3
                    14  1  3
                    15 23  1
                    22 10  5
                    31 21  3
                    37 28  8
                    42 11  3
                    47 25  4
                    50 26  1
     OUTPUT  7      15 23  2

UNIT  2 TYPE 16  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1       3  1  4
                     4  1  4
                    14  1  4
                    46 24  9
                    47 25  5

UNIT  3 TYPE  1  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1       5  2  1
                    48 25  9
```

```
UNIT  4 TYPE  1  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1       7  2  1
                    13  7  8
                    48 25 10

UNIT  5 TYPE  2  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1       5  2  3
                     9 11  3
                    13  7  3

UNIT  6 TYPE  3  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1       3  1  1
                     4  1  1
                     9 11  1
                    36 15  4
                    39 15  4
     OUTPUT  2       3  1  2
                     9 11  2
     OUTPUT  3      44 15  2
                    46 24  5

UNIT  7 TYPE  2  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1       7  2  3
                    13  7  4
                    48 25  8

UNIT  9 TYPE 11  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      11 11  1
     OUTPUT  2      11 11  2
     OUTPUT  3      10 11  1
     OUTPUT  4      10 11  2

UNIT 10 TYPE 11  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      12 11  1
     OUTPUT  2      12 11  2
                    13  7  5
     OUTPUT  3      28 11  3
     OUTPUT  4      28 11  4
                    29 11  4

UNIT 11 TYPE 11  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      22 10  3
     OUTPUT  2      22 10  4
     OUTPUT  3      24 11  1
     OUTPUT  4      24 11  2
                    25 11  2

UNIT 12 TYPE 11  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      13  7  1
     OUTPUT  2      13  7  2

UNIT 13 TYPE  7  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      14  1  1
     OUTPUT  2      14  1  2
     OUTPUT  3      18  3  3
     OUTPUT  4      19 11  3
     OUTPUT  5      21 11  3
     OUTPUT  6      14  1  5
                    48 25  7
     OUTPUT  7      14  1  6
     OUTPUT  8      37 28  3
                    48 25  4
     OUTPUT  9      28 11  2
```

```
UNIT 14 TYPE  1  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      10 11  3
                    18  3  1
                    19 11  1
                    47 25  6
                    50 26  2
     OUTPUT  2      18  3  2
                    19 11  2
                    47 25  7
     OUTPUT  7      47 25  8

UNIT 15 TYPE 23  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      13  7  6
                    40 15  3
                    47 25  3

UNIT 18 TYPE  3  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  3      44 15  3
                    46 24  6

UNIT 19 TYPE 11  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      21 11  1
     OUTPUT  2      21 11  2
     OUTPUT  3      28 11  1
     OUTPUT  4      29 11  2

UNIT 21 TYPE 11  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  3      22 10  1
     OUTPUT  4      22 10  2

UNIT 22 TYPE 10  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      12 11  3
     OUTPUT  2      12 11  4
     OUTPUT  3       5  2  2
                    11 11  3
                    23 11  1
                    24 11  3
     OUTPUT  4      23 11  2
                    24 11  4
     OUTPUT  6      46 24  8
     OUTPUT  8       7  2  2
                    47 25  9
                    50 26  3

UNIT 23 TYPE 11  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  4      25 11  4

UNIT 24 TYPE 11  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      25 11  1
                    25 11  3

UNIT 25 TYPE 11  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      30 11  1
     OUTPUT  2      30 11  2

UNIT 28 TYPE 11  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      29 11  1
                    29 11  3

UNIT 29 TYPE 11  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      30 11  3
     OUTPUT  2      30 11  4
```

```
UNIT 30 TYPE 11  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      31 21  1
     OUTPUT  2      31 21  2

UNIT 31 TYPE 21  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      37 28  1
                    39 15  3
                    47 25 10
     OUTPUT  2      37 28  2
                    39 15  1
                    48 25  2

UNIT 32 TYPE 14  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      37 28  7

UNIT 33 TYPE 14  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      37 28  4

UNIT 34 TYPE 14  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      37 28  6
                    40 15  1

UNIT 35 TYPE 14  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      37 28  5

UNIT 36 TYPE 15  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      46 24  1
                    46 24  7

UNIT 37 TYPE 28  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      41 11  1
                    48 25  5
                    50 26  5
     OUTPUT  2      40 15  4
                    41 11  2
     OUTPUT  3      40 15  2
     OUTPUT  4      44 15  4
                    46 24  4
     OUTPUT  5      46 24 10
     OUTPUT  6      10 11  4
                    11 11  4
                    36 15  3
                    48 25  1
                    50 26  4
     OUTPUT  7      13  7  7
                    48 25  3

UNIT 39 TYPE 15  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      44 15  1
                    46 24  3

UNIT 40 TYPE 15  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      41 11  3

UNIT 41 TYPE 11  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      42 11  1
     OUTPUT  2      42 11  2
     OUTPUT  4      42 11  4
                    48 25  6
```

```
UNIT 42 TYPE 11  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1       6  3  1
     OUTPUT  2       6  3  2

UNIT 43 TYPE 15  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      49 25  9

UNIT 44 TYPE 15  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      46 24  2

UNIT 45 TYPE 15  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      49 25  3

UNIT 46 TYPE 24  UNIT/TYPE/INPUT
     OUTPUT  1      49 25  8
     OUTPUT  2      45 15  2
                    49 25  2
     OUTPUT  3      43 15  1
                    45 15  1
                    49 25  4
     OUTPUT  4      49 25  5
     OUTPUT  5      49 25  6
     OUTPUT  6      49 25  7
     OUTPUT  7      43 15  2
     OUTPUT  9      49 25 10
     OUTPUT 10      49 25  1

UNIT 47 TYPE 25  UNIT/TYPE/INPUT

UNIT 48 TYPE 25  UNIT/TYPE/INPUT

UNIT 49 TYPE 25  UNIT/TYPE/INPUT

UNIT 50 TYPE 26  UNIT/TYPE/INPUT
```

A N H A N G 8

Aufschlüsselung des Energieverbrauchs
für die in Abb. 5.5 dargestellten Läufe

Lauf 14, Mode 1 (Energiemengen in kJ)

Trocknungs-abschnitt	Energieverbrauch kl. Gebläse	gr. Gebläse	Gesamt-strahlung	Q_{Solar}	Q_{Zusatz}	Q_{Gesamt}	Q_{Tabak}	SF	Q_{Last}	Laster-füllung
I	$5{,}443 \cdot 10^5$	$1{,}944 \cdot 10^5$	$2{,}011 \cdot 10^7$	$1{,}830 \cdot 10^6$	$5{,}257 \cdot 10^6$	$7{,}826 \cdot 10^6$	$6{,}153 \cdot 10^6$	0,23	$2{,}106 \cdot 10^6$	0,87
II	$6{,}653 \cdot 10^5$	$3{,}672 \cdot 10^5$	$3{,}390 \cdot 10^7$	$5{,}130 \cdot 10^6$	$1{,}885 \cdot 10^7$	$2{,}501 \cdot 10^7$	$2{,}083 \cdot 10^7$	0,20	$6{,}789 \cdot 10^6$	0,76
III	$6{,}048 \cdot 10^5$	$1{,}620 \cdot 10^5$	$2{,}953 \cdot 10^7$	$4{,}345 \cdot 10^5$	$6{,}171 \cdot 10^6$	$7{,}372 \cdot 10^6$	$4{,}262 \cdot 10^6$	0,06	$2{,}374 \cdot 10^6$	0,18
Gesamt	$1{,}814 \cdot 10^6$	$7{,}236 \cdot 10^5$	$8{,}354 \cdot 10^7$	$7{,}394 \cdot 10^6$	$3{,}028 \cdot 10^7$	$4{,}021 \cdot 10^7$	$3{,}124 \cdot 10^7$	0,18	$1{,}127 \cdot 10^7$	0,66

Lauf 7, Mode 2 (Energiemengen in kJ)

Trocknungs-abschnitt	Energieverbrauch kl. Gebläse	gr. Gebläse	Gesamt strahlung	Q_{Solar}	Q_{Zusatz}	Q_{Gesamt}	Q_{Tabak}	SF	Q_{Last}	Laster-füllung
I	$5{,}443 \cdot 10^5$	$3{,}024 \cdot 10^5$	$2{,}011 \cdot 10^7$	$5{,}168 \cdot 10^6$	$1{,}655 \cdot 10^6$	$7{,}671 \cdot 10^6$	$6{,}153 \cdot 10^6$	0,68	$6{,}824 \cdot 10^6$	0,76
II	$6{,}653 \cdot 10^5$	$5{,}508 \cdot 10^5$	$3{,}390 \cdot 10^7$	$1{,}014 \cdot 10^7$	$1{,}296 \cdot 10^7$	$2{,}431 \cdot 10^7$	$2{,}083 \cdot 10^7$	0,42	$2{,}310 \cdot 10^7$	0,44
III	$6{,}048 \cdot 10^5$	$3{,}240 \cdot 10^5$	$2{,}953 \cdot 10^7$	$1{,}158 \cdot 10^6$	$4{,}281 \cdot 10^6$	$6{,}368 \cdot 10^6$	$4{,}262 \cdot 10^6$	0,18	$5{,}440 \cdot 10^6$	0,21
Gesamt	$1{,}814 \cdot 10^6$	$1{,}178 \cdot 10^6$	$8{,}354 \cdot 10^7$	$1{,}647 \cdot 10^7$	$1{,}890 \cdot 10^7$	$3{,}835 \cdot 10^7$	$3{,}124 \cdot 10^7$	0,43	$3{,}536 \cdot 10^7$	0,46

Lauf 1, Mode 2 (Energiemengen in kJ)

Trocknungs-abschnitt	Energieverbrauch kl. Gebläse	Energieverbrauch gr. Gebläse	Gesamt-strahlung	Q_{Solar}	Q_{Zusatz}	Q_{Gesamt}	Q_{Tabak}	SF	Q_{Last}	Laster-füllung
I	$5{,}443 \cdot 10^5$	$3{,}240 \cdot 10^5$	$2{,}011 \cdot 10^7$	$6{,}288 \cdot 10^6$	$5{,}355 \cdot 10^5$	$7{,}692 \cdot 10^6$	$6{,}153 \cdot 10^6$	0,82	$6{,}824 \cdot 10^6$	0,92
II	$6{,}653 \cdot 10^5$	$5{,}616 \cdot 10^5$	$3{,}390 \cdot 10^7$	$1{,}237 \cdot 10^7$	$1{,}073 \cdot 10^7$	$2{,}433 \cdot 10^7$	$2{,}083 \cdot 10^7$	0,51	$2{,}310 \cdot 10^7$	0,54
III	$6{,}048 \cdot 10^5$	$3{,}348 \cdot 10^5$	$2{,}953 \cdot 10^7$	$1{,}979 \cdot 10^6$	$3{,}461 \cdot 10^6$	$6{,}379 \cdot 10^6$	$4{,}262 \cdot 10^6$	0,31	$5{,}440 \cdot 10^6$	0,36
Gesamt	$1{,}814 \cdot 10^6$	$1{,}220 \cdot 10^6$	$8{,}354 \cdot 10^7$	$2{,}064 \cdot 10^7$	$1{,}473 \cdot 10^7$	$3{,}840 \cdot 10^7$	$3{,}124 \cdot 10^7$	0,54	$3{,}536 \cdot 10^7$	0,58

Lauf 5, Mode 2 (Energiemengen in kJ)

Trocknungs-abschnitt	Energieverbrauch kl. Gebläse	Energieverbrauch gr. Gebläse	Gesamt strahlung	Q_{Solar}	Q_{Zusatz}	Q_{Gesamt}	Q_{Tabak}	SF	Q_{Last}	Laster-füllung
I	$5{,}443 \cdot 10^5$	$5{,}022 \cdot 10^5$	$4{,}972 \cdot 10^7$	$8{,}659 \cdot 10^6$	$-1{,}846 \cdot 10^6$	$7{,}860 \cdot 10^6$	$6{,}153 \cdot 10^6$	1,10	$6{,}813 \cdot 10^6$	1,27
II	$6{,}653 \cdot 10^5$	$6{,}372 \cdot 10^5$	$4{,}976 \cdot 10^7$	$1{,}887 \cdot 10^7$	$4{,}472 \cdot 10^6$	$2{,}464 \cdot 10^7$	$2{,}083 \cdot 10^7$	0,76	$2{,}334 \cdot 10^7$	0,81
III	$6{,}048 \cdot 10^5$	$2{,}916 \cdot 10^5$	$3{,}100 \cdot 10^7$	$5{,}178 \cdot 10^6$	$3{,}010 \cdot 10^5$	$6{,}375 \cdot 10^6$	$4{,}262 \cdot 10^6$	0,81	$5{,}479 \cdot 10^6$	0,94
Gesamt	$1{,}814 \cdot 10^6$	$1{,}431 \cdot 10^6$	$1{,}305 \cdot 10^8$	$3{,}271 \cdot 10^7$	$2{,}927 \cdot 10^6$	$3{,}887 \cdot 10^7$	$3{,}124 \cdot 10^7$	0,84	$3{,}563 \cdot 10^7$	0,92

Literaturverzeichnis

/1/ Bender, F.E., Cowan, A.M., Dillon, R.W. et al.: Solar Energy, Applications in Agriculture Potential, Research Needs and Adoption Strategies, III. Application of Solar Energy to Tobacco Curing, Agricultural Experiment Station. University of Maryland, (Jan. 1976), S. 61-75.

/2/ Chang, H.S., Huang, B.K.: Simulation of Thermal Behavior of Tobacco Curing in Solar Barn. Winter Meeting of ASAE, (1976),Paper No. 76-3549.

/3/ Drewes, P.L., Heath, D.B.: The Use of Solar Energy in curing Tobacco. 4th Annual Conf. of a Solar Energy Soc. of Canada, (1978).

/4/ Cundiff, J.S., Gawande, M., Threndgill, E.D.: A Solar System for Curing Tobacco in Conventional Forced Air Barns. Winter Meeting of ASAE, (1979), Paper No. 79-3569.

/5/ Nassar, A.H., Huang, B.K., Bowerd, C.G.: Microcomputer Control in Greenhouse Bulk Curing and Drying Solar System. Summer Meeting of ASAE and CSAF, (1979), Paper No. 79-3083.

/6/ Cuozzo, L.: Solar Tobacco Drying Plant, Solar Energy for Industry. Rom, (1978), S. 56-58.

/7/ Andreotti, L., Ciminale, A., Marchetti, G. et al.: Solar Tobacco Drying Plant. 2. Internationales Sonnenforum, Rom, (1978), S. 99-106.

/8/ Artykov, S., Maksudov, T.M.: Solar Tobacco Dryer, Geliotekhnika, Vol. 14, (1978), No. 1, S. 72-74.

/9/ Bose, Dr. S.C.: Solar Energy Systems for Continuous Process. The National Industrial Development Corporation Ltd., Chanakya Bhavan, New Dehli-21, India, (1980).

/10/ Johnson, W.H.: Solar Energy and Heat Recycling in Tobacco Curing. Winter Meeting of ASAE, (1979), Paper No. 79-3568.

/11/ Braunlich, G., Frey, K., Podesser, E.: Solar Heating Projects at the Institute for Environmental Research, Institut für Umweltforschung, Graz. Internat. Conf. Heliotechnique and Development, Vol. 2, (1975), S. 541-557.

/12/ Ifu-Institut für Umweltforschung: Gezielte Nutzung von Sonnenenergie für die Burley-Trocknung, Institut für Umweltforschung am Forschungszentrum Graz, (April 1980).

/13/ Sadykov, B., Vardiashvili, A., Sadykov, T., Kholliev, B.: Solar Drying for the Tobacco Industry, Geliotekhnika, Vol. 12, (1976), S. 71-73.

/14/ Seibert, T., Hechler, G.: Tabakbau in Deutschland, Pfälzische Verlagsanstalt GmbH, Neustadt-Landau, (1976).

/15/ Seibert, T.: Erfahrungen mit Sonnenkollektoren bei der Tabaktrocknung in der Bundesrepublik Deutschland. Der Deutsche Tabakbau, Nr. 18, (1980), S. 224-226.

/16/ Walton, L.R., Henson, W.H., McNeill, S.G., Parker, B.F., Bunn, J.M.: Solar Curing Facilities for Burley-Tobacco, Annual Meeting of ASAE, (1977), Paper No. 77-3002.

/17/ Broder, M.F., Foster, G.H., Baker, K.D.: Management and Control of Solar Collector-Heat Storage Grain Drying Systems. For Presentation at Winter Meeting American Society of Agricultural Engineers ASAE, (1976), Paper No. 79-3529.

/18/ Foster, G.H., Baker, K.D., Peart, R.M.: Methods of Drying Grain with solar Energy. Am. Sect. Int. Solar Energy Soc. Conference Phoenix, (2. Jan. 1980), S. 29-33.

/19/ Huang, B.K., El-Shaig, N.M.: Simulation Analysis of Greenhouse Solar Drying System for Peanuts and Grains. For Presentation at the Summer Meeting of American Society of Agricultural Engineering CSAF, (1979), Paper No. 79-3082.

/20/ Loewer, O.J., White, G.M., Parker, B.F., Ward, A.D.: Simulation of a High Temperature Solar Grain Drying System. Summer Meeting of ASAE and CSAE, (1979), Paper No. 79-3023.

/21/ Misra, R.N., Keener, H.M.: Solar Energy Storage for Grain Drying. Solar Energy Storage Options, Vol. 1, S. 297-308.

/22/ Misra, R.N., Keener, H.M., Roller, W.L.: Storage Versus No-Storage of Solar Heat for Corn Drying under Ohio Conditions. Summer Meeting of ASAE and CSAE, (1979), Paper No. 19-3024.

/23/ Niles, P.W., Carnegie, E.J., Pohl, J.G., Cherne, J.M.: Design and Performance of an Air Collector for Industrial Crop Dehydration. Solar Energy, Vol. 29, Pergamon Press, (1978), S. 19-23.

/24/ Carnegie, E.J., Niles, P.W., Stine, W.B.: Operation of an Industrial Drying System. Int. Solar Energy Soc. Meeting, Atlanta (1979), S. 1037-1041.

/25/ Ören, T.I., Zeigler, B.P.: Concepts for Advanced Simulation Methodologies. Simulation, Vol. 32 (1979), S. 69-82.

/26/ SCS Technical Committee on Model Credibility: Terminology for Model Credibility. Simulation, Vol. 32, (1979), S. 103 f.

/27/ TRNSYS - A Transient Simulation Program, Report Nr. 38-11. University of Wisconsin, Solar Energy Laboratory, V. 11.1, (April 1981).

/28/ Freeman, T.L. et al.: IEA Program to Test and Develop Solar Heating and Cooling Systems; Task I, Subtask D. Optimization of Solar Heating and Cooling Systems, Final Report (April 1981).

/29/ International Energy Agency Solar Heating and Cooling Program; Task 1. Investigation of the Performance of Solar Heating and Cooling Systems. A Modeling and Simulation Report on Subtask A, Edited by Ove Jorgansa (10/1979).

/30/ Kreider, J.F., Kreith, F., Editors: Solar Energy Handbook, Chapt. 17, Duff, W., Winn, C.B., Modeling of Solar Thermal System, S. 17.1-17.32.

/31/ Dickinson, W.C., Cheremisinoff, P.V., Editors: Solar Energy Technology Handbook, Chapter 42, Winn, C.B., Solar Simulation Computer Programs, S. 481-516.

/32/ Hughes, P.J., Klein, S.A., Close, D.J.: Packed Bed Thermal Storage Models for Solar Air Heating and Cooling Systems. Journal of Heat Transfer (May 1976).

/33/ Kuhn, J.K., von Fuchs, G.F., Warren, A.W., Zob, A.P.: Developing and Upgrading of Solar Thermal Energy Storage Simulation Models. Technical Progress Report for Period, March 1, 1978 - August 31, 1978. Contract Nr.: EG-77-C-02-4482, Boeing Computer Services Company, Seattle, Washington (Sept. 1978, Revised (July 1979).

/34/ Kaiser, R., Gottschalk, G.: Elementare Tests zur Beurteilung von Meßdaten. B.I.-Wissenschaftsverlag (1972).

/35/ Fiebig, M., Steinkemper, W.: Auslegung einer 30 to Tabaktrocknungsanlage. Statusbericht Sonnenenergie I, (1980), VDI-Verlag, S. 541-553.

/36/ Brandemuehl, M.J., Beckman, W.A.: Economic Evaluation and Optimization of Solar Heating Systems. Solar Energy, 22, (1979).

/37/ Czayka, L.: Systemwissenschaft, UTB-Verlag Dokumentation, Unitaschenbücher 185, Pullach bei München, (1974).

/38/ Pritsker, A.A.B.: Compilation of Definitions of Simulation. Simulation, Vol. 33, (1979), S. 61-63.

/39/ Nolan, R.L.: Verification and Validation of Computer Simulation Models. Proceedings of the 1972 Summer Computer Simulation Conference, San Diego/California, (1972), S. 1254-1265.

/40/ Harbordt, S.: Computersimulation in den Sozialwissenschaften. Bd. 1 Einführung und Anleitung, Bd. 2 Beurteilung und Modellbeispiele, Rowohlt Studium, Reinbek bei Hamburg, (1974).

/41/ Klaus, G., Liebscher, H.: Wörterbuch der Kybernetik. Überarbeitete Neuauflage, Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt/M., (1979).

/42/ Naylor, T.H., Finger, J.M.: Verification of Computermodels. Management Science, Vol. 14, (2/67), S. B 92-B 101.

/43/ Mihram, G.A.: Some Practical Aspects of the Verification and Validation of Simulation Models. Operations & Research Quarterly, Bd. 23, (1972), 1, S. 17-29.

/44/ Hermann, C.: Validation in Games and Simulation. Behavioral Science, Bd. 12, (1967), S. 216-233.

/45/ Bruno, R., Kersten, R.: Models and Methods for the Analysis and Optimization of Solar Energy Systems. 1. Deutsches Sonnenforum, Tagungsbericht Bd. 1, S. 62-66, (1977).

/46/ Hughes, P.J., Versteegan, P.L.: Survey of Simplified Design Methodologies for Solar Heating and Cooling Systems. Proceeding of ISES Conference, Atlanta, GA, (Juni 1979).

/47/ Little, A.D., inc.: Building Energy Analysis Computer Programs with Solar Heating and Cooling Systems Capabilities. Report prepared for U.S. Electric Power Research Institute, (EPRI ER-1146), (August 1979).

/48/ "Analysis Methods for Solar Heating and Cooling Applications (Passive and Active Systems)". Report prepared by the U.S. Solar Energy Research Institute (SERI/SP-35-232R), (Januar 1980).

/49/ Steinkemper, W., Fiebig, M.: Basisauslegung einer solaren Tabaktrocknungsanlage. Ruhr-Universität Bochum, Inst. für Thermo- und Fluiddynamik, Wärme- und Stoffübertragung, (1979).

/50/ Saravia, L., Alanis, E., Frigerio, E., de Paul, I.: Solar Tobacco Dryer. UNSA, Solar Energy Group (May 1978).

/51/ Wilczek, L.: Solare Tabaktrocknung in Salta/Nordargentinien mit 737 m^2 Sonnenkollektoren für Luftbetrieb. Statusbericht Sonnenenergie I, (1980), VDI-Verlag, S. 533-540.

/52/ Landesanstalt für Pflanzenbau und Tabakforschung, Forchheim: Tätigkeitsbericht, (1978/79).

/53/ Forschungsinstitut für Wärmetechnik e.V.: Leistungsmessung an einem Sonnenenergieflachkollektor mit Luft als Wärmeträger. Stuttgart, (August 1981).

/54/ ASHRAE Standards: Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors. ASHRAE 93-77, (1978).

/55/ Schumann, T.E.W.: A Liquid Flowing through a Porous Prism. J. Franklin Inst. 208, S. 405-416, (1929).

/56/ Coutier, J.P., Farber, E.A.: Two Applications of a Numerical Approach of Heat Transfer Process within Rockbeds. Solar Energy, Vol. 29, Nr.: 6, S. 451-462, (1982).

/57/ Löf, G.O.G., Hawley, R.W.: Unsteady State Heat Transfer between Air and Loose Solids. Ind. Engng. Chem. 40, S. 1061, (1940).

/58/ Jefferson, C.P.: Prediction of Breakthrough Curves in Packed Beds. AIChE Journal (Vol. 18, Nr.: 2),(März 1972).

/59/ Daugherty, M.A., Mitchell, J.W., Duffie, J.A.: Comparison of Actual and Simulated Performance of the Arlington House System. Proceedings Systems Simulation and Economic Analysis, San Diego/Kalifornien, (Jan. 1980).

/60/ Shingleton, J.G., Cassel, D.E., McCabe, M.E.: Computer Modeling of Air Leakage in a Solar Air Heating System. Proceedings Systems Simulation and Economic Analysis, San Diego/Kalifornien, (Jan. 1980).

/61/ Close, D.J.: A Design Approach for Solar Processes. Solar Energy, (1967), Nr. 2, S. 112-122.

/62/ Duffie, J.A., Beckman, W.A.: Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons, New York, (1980).

/63/ Bossel, H., Müller-Reißmann, K.F., Krause, F.: Energiewende. Rowohlt, (1980).

/64/ Müller-Reißmann, K.F., Bossel, H.: Kriterien für Energieversorgungssysteme. Inst. für angewandte Systemforschung und Prognose (ISP), Hannover, (1979).

L e b e n s l a u f

Klaus-Dieter Bolst	geboren am 13.7.1947 in Wanne-Eickel
Eltern:	Karl Bolst, Feuerungsbaupolier, und seine Ehefrau Erna Bolst, geb. Lehnert
Schulen:	Volksschule: April 1954 - März 1958 in Bochum Gymnasium: April 1958 - November 1966 Theodor-Körner-Schule in Bochum Reifeprüfung: November 1966
Bundeswehr:	Wehrdienst als Zeitsoldat beim Artillerie-regiment 7 in Dülmen von Januar 1967 - Januar 1969
Studium:	Maschinenbau an der Ruhr-Universität Bochum von Oktober 1968 - Oktober 1974, Begleitfach: Angewandte Informatik an der Abteilung für Bauingenieurwesen Diplomprüfung: Oktober 1974
Tätigkeit:	November 1974 - Mai 1975 mdVb-Assistent, Juni 1975 - April 1977 wissenschaftlicher Angestellter, Mai 1977 - ... Wissenschaftlicher Assistent am Institut für Thermo- und Fluiddynamik der Ruhr-Universität, Lehrstuhl: Prof. Dr.-Ing. M. Fiebig, März/April 1982 Vorlesungstätigkeit an der National-Universität-Salta / Argentinien